

## 14. APLICACIONES GEOLÓGICO-MINERAS

### 14.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen las técnicas topográficas aplicables para la determinación de la dirección, el buzamiento y la potencia, parámetros que definen un estrato o una formación estratiforme. El conocimiento de la geometría del cuerpo mineralizado es fundamental para su correcta ubicación en el espacio y para su cubicación, tanto en los trabajos de investigación minera como en los de diseño y realización de labores a cielo abierto o por interior.

Se define un *estrato* como un nivel simple de litología homogénea y gradacional, depositado de forma paralela a la inclinación original de la formación. Está separado de los estratos adyacentes por superficies de erosión o por cambios abruptos en el carácter y presenta una configuración tabular.

Denominamos *formación estratiforme* a una estructura geológica que sin ser un estrato, puesto que no comparte su misma génesis, sí que presenta una configuración tabular similar a la de éste.

Las superficies que los limitan se denominan *techo* y *muro*. En el caso de un estrato definiremos como *techo* a la superficie que separa la formación objeto de estudio de materiales más modernos. De igual forma, definiremos como *muro* a la superficie que separa el estrato de materiales más antiguos.

En el caso de formaciones estratiformes, la superficie de la formación cortada en primer lugar por un hipotético sondeo vertical será el *techo*. La formación inferior será el *muro*.

A partir de este momento, hablaremos indistintamente de estrato o de formación estratiforme, ya que los parámetros que vamos a determinar son puramente geométricos y no dependen de la génesis de la formación.

#### 14.1.1.- Conceptos básicos

En extensiones cortas podemos asimilar tanto el *techo* como el *muro* de un estrato a un plano. La *dirección* de dicha formación será la recta intersección del plano de *techo* o de *muro* con un plano horizontal (figura 14.1). Representaremos este parámetro mediante el acimut correspondiente a dicha recta. Será igualmente válido el acimut dado en cualquiera de los dos sentidos de la recta.

Se define como *buzamiento* (buzamiento real) de un estrato el ángulo formado por la línea de máxima pendiente contenida en el plano del estrato y su

proyección sobre un plano horizontal (figura 14.1). Deberá darse también la orientación de la línea de máxima pendiente en su sentido descendente, materializada por el acimut de su proyección horizontal.

Puesto que la línea de máxima pendiente es perpendicular a la dirección del estrato, la diferencia entre ambos acimutes será de  $\pm \pi/2$ .

Definiremos como *buzamiento aparente* el ángulo formado por una línea contenida en el plano del estrato, y distinta de la de máxima pendiente, y su proyección sobre un plano horizontal. Un buzamiento aparente será siempre menor que el buzamiento real.

La *potencia* (potencia real) de un estrato será la distancia que separa los planos de techo y de muro, medida perpendicularmente a éstos. Cualquier otra medición de esta distancia, distinta de la perpendicular entre techo y muro, se denominará *potencia aparente* y será siempre mayor que la potencia real.

Denominamos *longitud* de un estrato a la distancia, medida según la recta dirección, entre los límites del mismo.

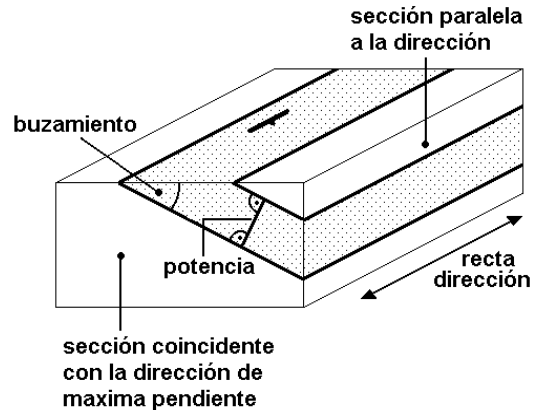


Fig. 14.1. Dirección, buzamiento y potencia

## 14.2.- DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO

Estos dos parámetros suelen medirse al mismo tiempo y con operaciones consecutivas, debido a la relación geométrica que existe entre ellos. Antes de pasar a su determinación vamos a ver cómo se deducen los buzamientos reales a partir de los aparentes y viceversa. Este proceso es importante, tanto para el cálculo directo como por formar parte de procesos generales de cálculo de buzamientos a partir de las coordenadas conocidas de varios puntos del estrato.

Sea  $\beta$  el ángulo de buzamiento real,  $\alpha$  el aparente e  $\hat{i}$  el ángulo horizontal que forman las direcciones de ambos buzamientos. En el caso de la figura será:

$$\hat{i} = \theta_{\text{BUZAMIENTO APARENTE}} - \theta_{\text{BUZAMIENTO REAL}}$$

Con el fin de facilitar el proceso de cálculo, vamos a considerar que los puntos  $D$  y  $C$  de la figura 14.2 tienen la misma altitud.  $D'$  y  $C'$  son sus proyecciones sobre un plano horizontal. Para obtener la expresión que relaciona los tres valores angulares anteriores hacemos:

$$\text{tg } \beta = \frac{DD'}{OD'}$$

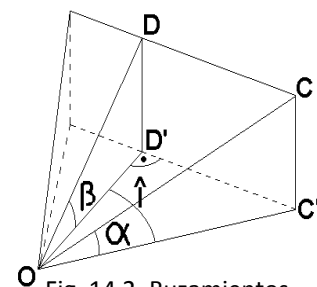


Fig. 14.2. Buzamientos real y aparente (1)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CC'}{OC'}$$

$$\cos \hat{I} = \frac{OD'}{OC'}$$

y como  $DD' = CC'$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{DD'}{OD'} = \frac{OC' \operatorname{tg} \alpha}{OC' \cos \hat{I}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \hat{I}}$$

Podemos proceder de forma semejante con una disposición diferente de los puntos, como la de la figura 14.3, para llegar a la misma expresión que relaciona los buzamientos real y aparente y el ángulo comprendido entre las direcciones de ambos buzamientos.

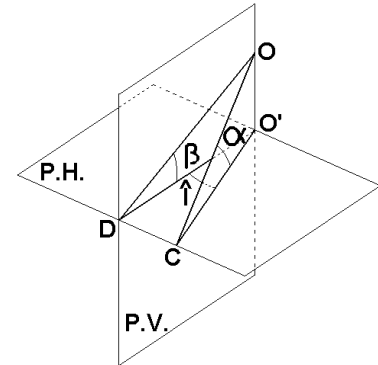


Fig. 14.3. Buzamientos real y aparente (2)

A continuación vamos a estudiar los distintos casos que se pueden presentar en el cálculo de dirección y buzamiento, atendiendo tanto a los instrumentos que permiten medirlos directamente como al procedimiento de obtención a partir de coordenadas de puntos, tomados todos en el techo o en el muro del estrato.

#### 14.2.1.- Con brújula de geólogo

Las brújulas empleadas para aplicaciones geológicas tienen las siguientes características:

- Pueden ser de limbo fijo o de limbo móvil.
- Están dotadas de un nivel de burbuja, normalmente esférico.
- Incorporan distintos sistemas para lanzar visuales.
- Incorporan un clinómetro para medir inclinaciones.

Son procedimientos que aportan precisiones inferiores a las de las técnicas topográficas, pero que en muchos casos son suficientes.

Para emplear una brújula de geólogo debemos determinar sobre el estrato la línea de máxima pendiente o una línea horizontal contenida en él. Ambas líneas son perpendiculares entre sí, por lo que determinada una se conoce también la otra. Una línea horizontal se puede determinar con un nivel de burbuja. La línea de máxima pendiente se puede materializar dejando caer una pequeña cantidad de agua y si ésta describe una línea sinuosa, se fijará como línea de máxima pendiente la línea del eje simétrico del camino marcado por el agua.

Una vez determinadas estas direcciones se coloca el único lateral recto de la brújula paralelo a la línea horizontal y se mide la dirección. A continuación se coloca este lateral paralelo a la línea de máxima pendiente y, con ayuda del clinómetro, se determina el buzamiento.

Debido a las irregularidades naturales que presenta la superficie del estrato, para obtener un valor medio de estos parámetros se suele colocar un elemento plano y rígido, por ejemplo una carpeta, y sobre él se coloca la brújula.

También es conveniente realizar varias mediciones de dirección y buzamiento, que nos permitan calcular el valor más probable de cada parámetro.

### 14.2.2.- Mediante procedimientos topográficos

Pueden emplearse taquímetros o estaciones totales. Por su rapidez y comodidad son muy apropiados los equipos láser, capaces de realizar mediciones sin prisma en distancias cortas.

Para medir la dirección del estrato se estaciona el instrumento topográfico frente a él y se realizan las operaciones necesarias para orientarlo. Esto puede hacerse en campo, para obtener sobre el terreno el valor de la dirección, o posteriormente en gabinete.

A continuación se visan dos puntos  $P_1$  y  $P_2$  del estrato, que tengan la misma altitud, y se miden las distancias reducidas y las lecturas horizontales (figura 14.4). Los puntos deben estar lo bastante alejados entre sí como para que el valor de la dirección sea preciso.

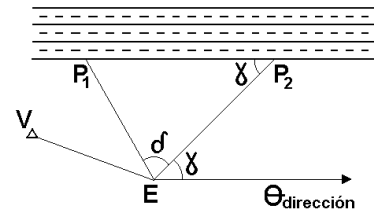


Fig. 14.4. Dirección: procedimientos topográficos

Calculamos  $\delta$ , ángulo horizontal que forman las visuales, por diferencia de lecturas horizontales:

$$\delta = L_E^{P_2} - L_E^{P_1}$$

Aplicando el teorema del coseno calculamos la distancia reducida entre los dos puntos visados:

$$P_1P_2 = \sqrt{(EP_1)^2 + (EP_2)^2 - 2 EP_1 EP_2 \cos \delta}$$

y aplicando el teorema del seno calculamos el ángulo  $\gamma$ :

$$\frac{P_1P_2}{\sin \delta} = \frac{EP_1}{\sin \gamma} \quad \text{sen} \gamma = \frac{EP_1 \sin \delta}{P_1P_2}$$

En el caso de la figura, sumando al acimut de la alineación  $E-P_2$  el ángulo  $\gamma$ , obtenemos el acimut de la recta dirección.

Una vez conocido su acimut, se pueden lanzar visuales perpendiculares a la recta dirección para determinar el buzamiento. Se coliman dos puntos  $P_3$  y  $P_4$  situados sobre la línea intersección del plano vertical que pasa por  $E$  y es perpendicular a dicha recta y el plano del estrato (figura 14.5). Los puntos se coliman visando con un acimut:

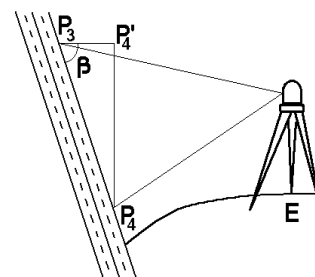


Fig. 14.5. Buzamiento: procedimientos topográficos

$$\theta_{visual} = \theta_{dirección} \pm \frac{\pi}{2}$$

La línea intersección será la línea de máxima pendiente. Medimos las distancias reducidas  $EP_3$  y  $EP_4$ , lo que nos permite calcular:

$$P_3P'_4 = EP_3 - EP_4$$

El desnivel entre ambos puntos será la diferencia de las tangentes topográficas, empleadas con su signo:

$$Z_{P_4}^{P_3} = t_E^{P_3} - t_E^{P_4}$$

Una vez obtenidos estos valores, el cálculo del buzamiento  $\beta$  es inmediato:

$$tg \beta = \frac{Z_{P_4}^{P_3}}{P_3P'_4}$$

Se debe indicar también el acimut del buzamiento, que será el de la recta dirección sumándole o restándole  $\pi/2$ .

### 14.2.3.- A partir de las coordenadas de tres puntos del estrato

Los puntos pueden estar situados en la superficie o en el subsuelo. El procedimiento de cálculo es aplicable en todos los casos. Los puntos medidos deben corresponder al mismo plano, techo o muro, del estrato.

Las coordenadas de los puntos se medirán por aplicación de las técnicas que ya conocemos. En el caso de un sondeo se conocen (figura 14.6):

- Las coordenadas de su punto inicial  $B$ .
- El acimut del sondeo  $\theta_s$ , medido respecto a su sentido de avance.
- La inclinación del sondeo  $\hat{i}$ , ángulo medido respecto a la vertical
- La longitud del sondeo  $l$  desde la boca hasta el contacto con la formación estratiforme que pretendemos estudiar.

Con estos datos podemos calcular las coordenadas del punto de contacto  $F$  del sondeo con el estrato:

$$\text{sen } \hat{i} = \frac{VF}{BF} = \frac{VF}{l} \quad VF = l \text{ sen } \hat{i}$$

que será la distancia reducida entre la boca del sondeo y el punto de interés.

$$\text{cos } \hat{i} = \frac{BV}{BF} = \frac{\Delta Z}{l} \quad \Delta Z = l \text{ cos } \hat{i}$$

que será el desnivel entre la boca del sondeo y el punto de interés.

Por tanto, las coordenadas del punto  $F$  serán:

$$X_F = X_B + VF \text{ sen } \theta_s = X_B + l \text{ sen } \hat{i} \text{ sen } \theta_s$$

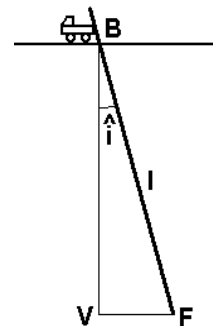


Fig. 14.6. Sondeo inclinado

$$Y_F = Y_B + VF \cos \theta_s = Y_B + l \operatorname{sen} \hat{i} \cos \theta_s$$

$$Z_F = Z_B - \Delta Z = Z_B - l \cos \hat{i}$$

Conocidas las coordenadas de tres puntos del estrato,  $A$ ,  $B$  y  $C$ , operamos de la siguiente forma: Establecemos un plano horizontal de comparación  $AB'C'$ , que pasa por el punto menos elevado de los tres. Vamos a suponer que, en nuestro caso,  $A$  es el punto de menor altitud y  $C$  el de mayor altitud (figura 14.7).

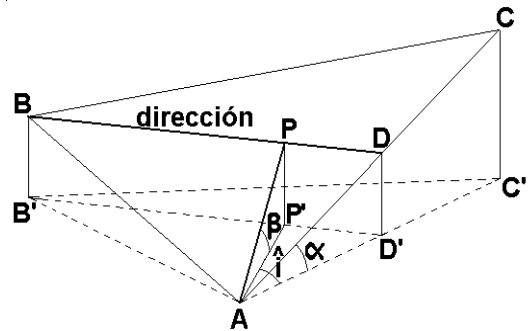


Fig. 14.7. Dirección y buzamiento a partir de 3 sondeos

La dirección del estrato la marcan las líneas horizontales contenidas en él. Para mayor comodidad de cálculo utilizaremos la línea horizontal que pasa por el punto de altitud intermedia,  $B$ . Para calcular el acimut de esta línea se necesitan las coordenadas de otro punto sobre ella,  $D$ , que se calculará sobre la alineación  $A-C$  de la forma siguiente:

Necesitamos la distancia vertical  $DD'$ , que será igual a  $BB'$  y se calcula:

$$DD' = BB' = Z_B - Z_A$$

Como los triángulos  $ACC'$  y  $ADD'$  son semejantes:

$$\frac{AD'}{AC'} = \frac{DD'}{CC'} \quad AD' = \frac{AC' DD'}{CC'}$$

donde  $CC'$  es la diferencia entre las coordenadas  $Z$  de  $C$  y  $A$  y  $AC'$  se calcula a partir de las coordenadas planas de ambos puntos.

También podemos calcularlo a partir de la pendiente:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CC'}{AC'} = \frac{DD'}{AD'} \quad AD' = \frac{DD'}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{DD'}{CC'/AC'} = \frac{AC' DD'}{CC'}$$

En cuanto al acimut, tenemos que  $\theta_A^D = \theta_A^C$ , que se calcula fácilmente a partir de las coordenadas de  $A$  y  $C$ . Conocidos acimut y distancia, calculamos las coordenadas de  $D$ :

$$X_D = X_A + AD' \operatorname{sen} \theta_A^D$$

$$Y_D = Y_A + AD' \cos \theta_A^D$$

$$Z_D = Z_B$$

Con estos datos se puede calcular el acimut de la alineación  $B-D$ , que coincide con el de la recta dirección. Como hemos indicado, son válidos los dos valores  $\theta_B^D$  y  $\theta_D^B$ .

Para determinar el buzamiento es preciso calcular tanto el valor de  $\beta$  como el acimut que define el sentido descendente del estrato. Será:

$$\theta_P^A = \theta_B^D \pm \pi / 2$$

Para obtener el valor de  $\beta$  aplicaremos la expresión conocida:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \hat{i}}$$

Calculamos el buzamiento aparente  $\alpha$  en la alineación A-C:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CC'}{AC'}$$

y el ángulo:

$$\hat{i} = \theta_A^C - \theta_A^P$$

Con estos datos ya se puede calcular el buzamiento del estrato.

### 14.3.- POTENCIA

Para determinar la potencia real  $P$  del estrato supondremos que se han determinado previamente la dirección y el buzamiento.

#### 14.3.1.- Cálculo por observaciones en superficie

Estacionamos en un punto  $E$ , frente al afloramiento, y lanzamos visuales perpendiculares a la recta dirección. Colimamos dos puntos  $A$  y  $B$ , pertenecientes respectivamente al techo y al muro del estrato, situados en el plano vertical generado por el movimiento de cabeceo del anteojo. Podemos encontrarnos dos casos:

#### $\theta$ del buzamiento = $\theta$ de las visuales:

Medidas las distancias reducidas y las tangentes topográficas correspondientes a las dos visuales, calculamos  $AB'$  (diferencia entre las distancias reducidas) y  $BB'$  (diferencia entre los desniveles). En la figura 14.8:

$$AB = \sqrt{(AB')^2 + (BB')^2}$$

$AB$  es la potencia aparente.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{BB'}{AB'}$$

Una vez calculado  $\delta$  y conocido el buzamiento  $\beta$ , será:

$$\gamma = \pi - \beta - \delta$$

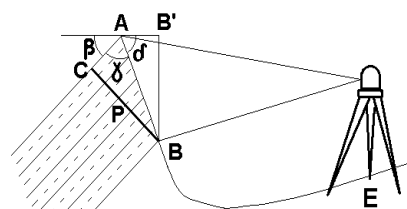


Fig. 14.8. Potencia: observaciones en superficie (1)

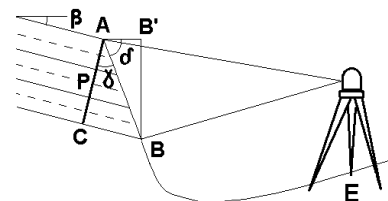


Fig. 14.9. Potencia: observaciones en superficie (2)

La potencia real  $P$  se calcula:

$$P = AB \operatorname{sen} \gamma$$

**$\theta$  del buzamiento =  $\theta$  de las visuales  $\pm \pi$ :**

Procedemos como en el caso anterior, calculando la distancia  $AB$  y el ángulo  $\delta$ . En la figura 14.9:

$$\gamma = \pi + \beta - \frac{\pi}{2} \quad \delta = \frac{\pi}{2} + \beta - \delta$$

La potencia real  $P$  se calcula:

$$P = AB \operatorname{cos} \gamma$$

**14.3.2.- Cálculo a partir de datos de sondeos**

Sean  $A$  y  $C$  los puntos de intersección del sondeo con el techo y el muro del estrato. Como antes, suponemos conocidos la dirección y el buzamiento de éste. Vamos a considerar un sistema cartesiano de coordenadas cuyo origen coincida con  $C$  y cuyo eje  $Y$  siga la dirección del acimut del buzamiento (figura 14.10). El eje  $X$  sigue, por tanto, la dirección del muro del estrato. Proyectaremos la potencia aparente  $AC$  sobre el plano vertical  $ZY$ , obteniendo una nueva potencia aparente  $BC$ .

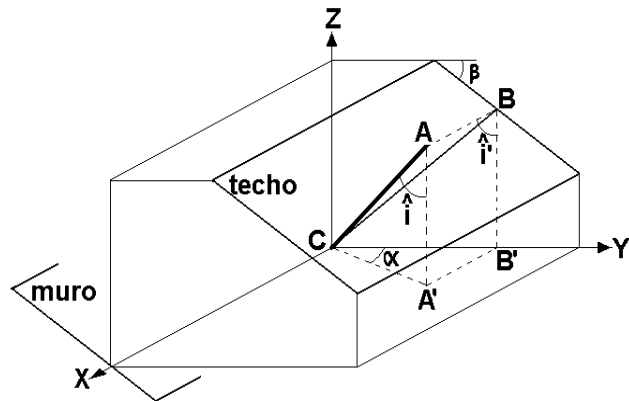


Fig. 14.10. Potencia: mediante datos de sondeos (1)

Para ello, a partir de las coordenadas de  $A$  y  $C$  calculamos  $AA'$  (diferencia de coordenadas  $Z$ ) y  $CA'$  (distancia reducida entre ambos puntos). El ángulo  $\alpha$  será la diferencia en valor absoluto entre los acimutes del sondeo y del buzamiento a la que sumamos o restamos  $200^g$ , en caso necesario, de manera que esté entre  $0^g$  y  $100^g$ . Tenemos:

$$CB' = CA' \operatorname{cos} \alpha$$

$$BB' = AA'$$

y la potencia aparente, proyectada sobre el plano  $ZY$ , será:

$$CB = \sqrt{(CB')^2 + (BB')^2}$$

Calculamos también el ángulo  $i'$ :

$$\operatorname{tg} i' = \frac{CB'}{BB'}$$

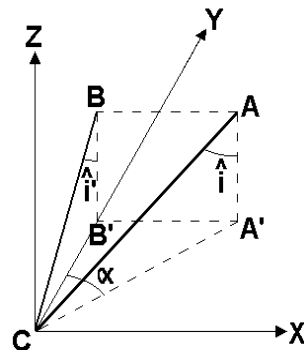


Fig. 14.11. Potencia: mediante datos de sondeos (2)



Para calcular la potencia real  $P$  del estrato, proyectamos la potencia aparente  $BC$  sobre la recta perpendicular a la de máxima pendiente. Nos podemos encontrar con dos casos:

$$\theta_B^C = \theta_{\text{buzamiento}} \pm \pi$$

En la figura 14.12:

$$P = CB \cos(\hat{i}' - \beta)$$

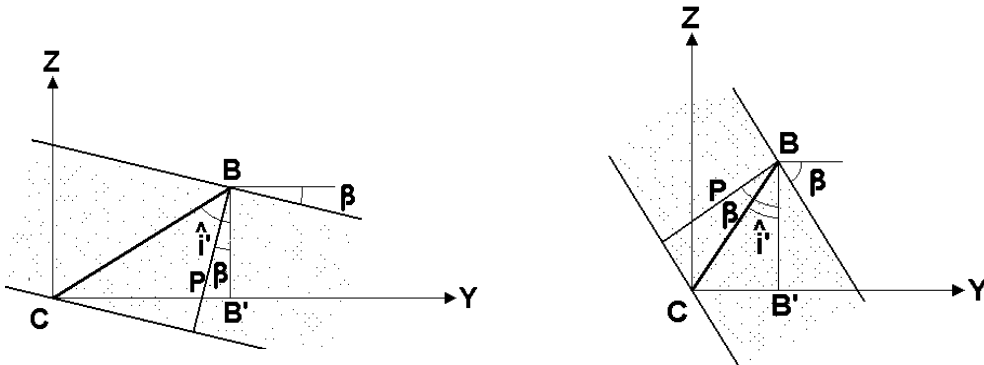


Fig. 14.12. Potencia: mediante datos de sondeos (3)

$$\theta_B^C = \theta_{\text{buzamiento}}$$

En la figura 14.13:

$$P = CB \cos(\beta + \hat{i}')$$

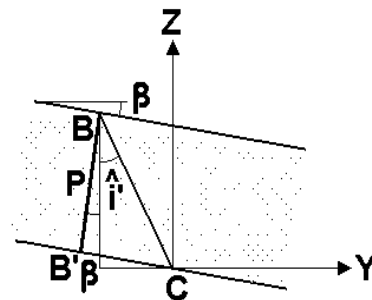


Fig. 14.13. Potencia: mediante datos de sondeos (4)

## 15. TOPOGRAFÍA EN EXPLOTACIONES MINERAS A CIELO ABIERTO

### 15.1.- INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto es una de las actividades humanas que en mayor medida alteran la morfología de las zonas a las que afecta. Este sistema de producción de materias primas supone la extracción de los materiales estériles que se superponen a las masas mineralizadas, creando huecos de considerables proporciones que sólo en ocasiones vuelven a llenarse. Las tierras estériles, si el método de explotación no permite volver a depositarlas en el hueco creado, se almacenan en vertederos (vacies) cuya forma y dimensiones varían continuamente a medida que avanza la explotación minera. La normativa medio-ambiental obliga al minero a prever y desarrollar una serie de medidas que minimicen el impacto de las labores mineras y que van a suponer nuevas modificaciones de la morfología del terreno.

Los trabajos topográficos en explotaciones de este tipo deben adecuarse al ritmo con que la minería moderna modifica el entorno en el que se asienta. Algunas de las tareas con las que se enfrenta el equipo topográfico de una empresa minera adquieren un carácter crítico, debido a las limitaciones de tiempo para realizarlas y a que condicionan otros trabajos posteriores, que a su vez son vitales para el funcionamiento de la mina.

El equipo se ocupa también de apoyar a los restantes equipos técnicos de la mina en la elaboración y seguimiento de los distintos proyectos y planes que van a guiar la marcha de la explotación. En todos estos trabajos van a emplearse distintas técnicas topográficas, aplicadas a levantamientos planimétricos y altimétricos, a replanteos y a cubicaciones.

Los trabajos topográficos en una explotación minera a cielo abierto presentan una serie de características propias:

- Se localizan en un área relativamente pequeña.- Aunque algunas explotaciones afectan a superficies importantes (figura 15.1), la actividad de una mina a cielo abierto se desarrolla en una zona cuyo tamaño máximo alcanza algunos centenares de hectáreas. En esta zona se localiza la corta o cortas, los vertederos y las instalaciones que completan el complejo minero.
- Se desarrollan a lo largo de un periodo de tiempo extenso, comenzando varios años antes de que la mina entre en producción y, con frecuencia, terminando después de que el yacimiento se haya agotado, mientras se completan las últimas fases de los trabajos de restauración del área afectada.
- Son de tipo muy variado y en ellos se aplican técnicas muy diferentes.

- En algunos de ellos, especialmente los de carácter más sistemático, el factor tiempo es crítico: se dispone de pocos días (o pocas horas) para su realización y hay que evitar, en lo posible, que puedan afectar a la producción.
- Determinan, en buena medida, la correcta marcha de la explotación. Por tanto, también son críticos en este sentido.

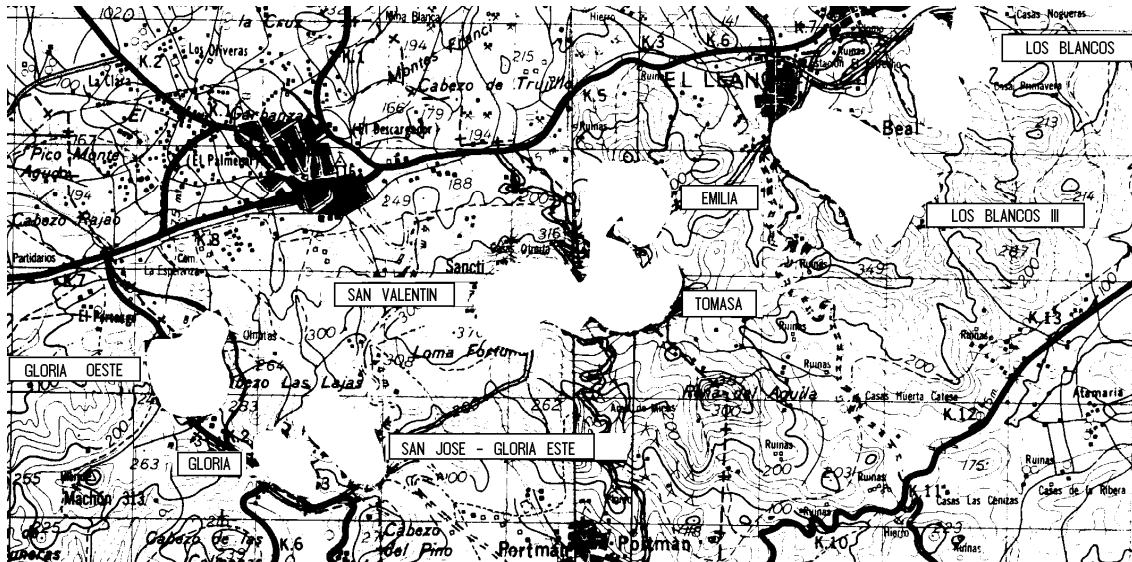


Fig. 15.1. Explotaciones mineras de la SMMPE en la Sierra de Cartagena-La Unión

Se han considerado tres etapas distintas de la actividad minera. Conviene señalar que esta división es una simplificación de la realidad, ya que muchas de las tareas contempladas se extienden en el tiempo y coexisten con las de etapas posteriores. Estas etapas son las siguientes:

- Trabajos topográficos iniciales: Consisten en el establecimiento de la infraestructura topográfica (redes de vértices) y en la elaboración de la cartografía inicial de la zona afectada, necesaria para los distintos proyectos (explotación, restauración, instalaciones, etc.):
  - Establecimiento de la red trigonométrica.
  - Levantamiento topográfico inicial.
- Trabajos topográficos de apoyo a la elaboración del proyecto de explotación:
  - Investigación geológica.
  - Proyecto de explotación. Vertederos. Planes de restauración.
  - Proyectos de instalaciones, accesos, líneas eléctricas, etc.
- Trabajos topográficos durante la etapa de producción de la explotación: Se trata de trabajos, con frecuencia sistemáticos, que posibilitan la marcha correcta de la explotación minera:
  - Levantamiento de los avances de frentes de trabajo y vertederos. Marcaje de las separatrices entre mineral y estéril.
  - Marcaje de sondeos de control de leyes. Levantamiento o marcaje de barrenos de voladura.
  - Nivelación de plantas de trabajo.
  - Control de estabilidad de taludes.

- Apoyo topográfico a los trabajos de restauración.

Vamos a suponer que todos estos trabajos serán realizados por el equipo topográfico de la explotación minera, aunque en la práctica algunos de ellos (especialmente los iniciales) suelen contratarse a empresas especializadas, incluso si la explotación dispone de su propio equipo.

## 15.2.- TRABAJOS TOPOGRÁFICOS INICIALES

Este apartado se refiere a todos los trabajos topográficos destinados a proporcionar las redes de apoyo y la cartografía necesaria para el desarrollo de las primeras fases de la actividad minera: exploración inicial, investigación geológica, adquisición de terrenos, etc., hasta la elaboración del proyecto de explotación.

### 15.2.1.- Establecimiento de la red trigonométrica

Es la primera etapa del trabajo topográfico y, en principio, se aplican los métodos habituales para el establecimiento de este tipo de redes: intersección directa para la red de vértices, intersección inversa para determinar puntos trigonométricos complementarios, itinerario para establecer las redes topográficas. La red trigonométrica puede sustituirse por un levantamiento con equipos GNSS, dando coordenadas a un número suficiente de puntos bien repartidos por la zona afectada.

En el establecimiento de redes de vértices en minería a cielo abierto hay que tener en cuenta que:

- la actividad minera puede durar muchos años y las redes de vértices de apoyo deben estar disponibles en todo momento.
- sin embargo, la propia naturaleza de la actividad minera puede suponer la desaparición de algunos de estos vértices, especialmente de los situados en zonas afectadas por la corta o por el vertedero (figura 15.2). En otros casos, las señales permanentes que marcan los vértices pueden desaparecer debido a los trabajos de infraestructura, al transporte, etc.
- las características de muchos de los trabajos mineros exigen disponer de un gran número de vértices de apoyo permanentes, cubriendo toda la zona de actividad minera.

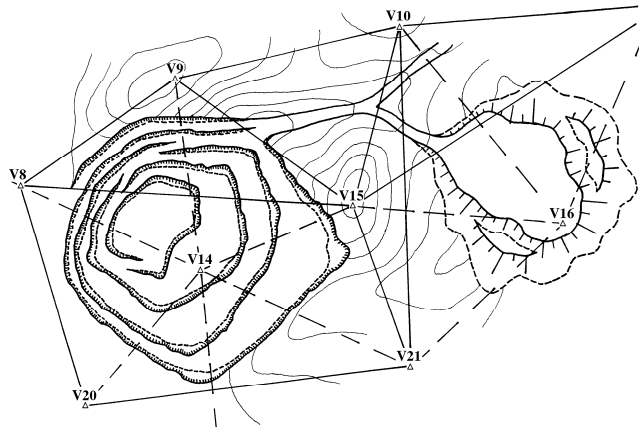


Fig. 15.2. Red trigonométrica

Por estas razones puede ser recomendable establecer una red de vértices trigonométricos y topográficos mucho más densa que las habituales en trabajos topográficos no mineros. Una posible solución consiste en establecer dos redes, una

con unos pocos triángulos de lados más grandes y vértices situados en puntos seguros; otra más densa, completada con puntos trigonométricos complementarios y vértices topográficos.

Toda la red debe revisarse con frecuencia (y, preferiblemente, de forma sistemática) y mantenerse totalmente operativa, especialmente en las proximidades de las zonas en producción.

### **15.2.2.- Levantamiento inicial**

Las distintas fases del trabajo minero se apoyarán en planos a distintas escalas. En su caso, los planos y sus escalas deben elaborarse de acuerdo con la legislación vigente. Los siguientes valores se dan simplemente a título de referencia, ya que en la práctica puede haber variaciones importantes:

- Trabajos de exploración/investigación: escalas 1:10.000 a 1:2.500.
- Proyecto de explotación: 1:5.000 a 1:1.000.
- Planes de restauración: 1:10.000 a 1:2.500.
- Otros proyectos: 1:1.000 a 1:200. Incluye infraestructuras, instalaciones, accesos y, eventualmente, algunas fases del plan de restauración.

La escala determinante suele ser la del proyecto de explotación y, por tanto, esta será la que hay que tener en cuenta a la hora de planificar el levantamiento. Otros proyectos pueden necesitar planos a escalas mayores, que suelen ser objeto de levantamientos específicos.

Una forma apropiada de realizar el levantamiento inicial es, por supuesto, el empleo de fotogrametría aérea. La elección de la escala y condiciones del vuelo se hará en función de la escala determinante en los planos, es decir, de aquella que vaya a emplearse para elaborar el proyecto de explotación. Los trabajos fotogramétricos serán realizados por el equipo topográfico de la propia empresa, si ésta dispone de los medios necesarios, o se contratarán. La cartografía a mayor escala, para proyectos de instalaciones, etc., puede realizarse por fotogrametría terrestre, si el terreno lo admite, o por métodos topográficos convencionales.

La otra posibilidad es realizar un levantamiento topográfico clásico. En ambos casos, los trabajos se apoyarán en las redes de vértices previamente establecidas.

### **15.3.- TRABAJOS TOPOGRÁFICOS EN LA FASE DE PROYECTO**

En este apartado agrupamos todos los trabajos topográficos de apoyo a las fases de investigación geológica, elaboración del proyecto de explotación, vertederos de estériles, plan de restauración, proyectos de instalaciones, accesos, líneas eléctricas, etc.

### 15.3.1.- Apoyo a la investigación geológica

Según los primeros estudios geológicos (escalas 1:10.000 a 1:2.500) y con apoyo de la cartografía inicial, se diseña la malla de sondeos de investigación, definiendo sus dimensiones y su orientación. Las direcciones principales de la malla no tienen por qué coincidir con la dirección de la meridiana ni con ninguna otra orientación preestablecida, sino que vendrán condicionadas por la naturaleza del yacimiento. Se elige un punto inicial, que será una de las esquinas de la malla, y se calculan a partir de él las coordenadas de todas las intersecciones de la malla, donde irán ubicados los sondeos. Normalmente se comienza con mallas amplias, que luego se van cerrando a medida que se conocen los primeros resultados de los sondeos.

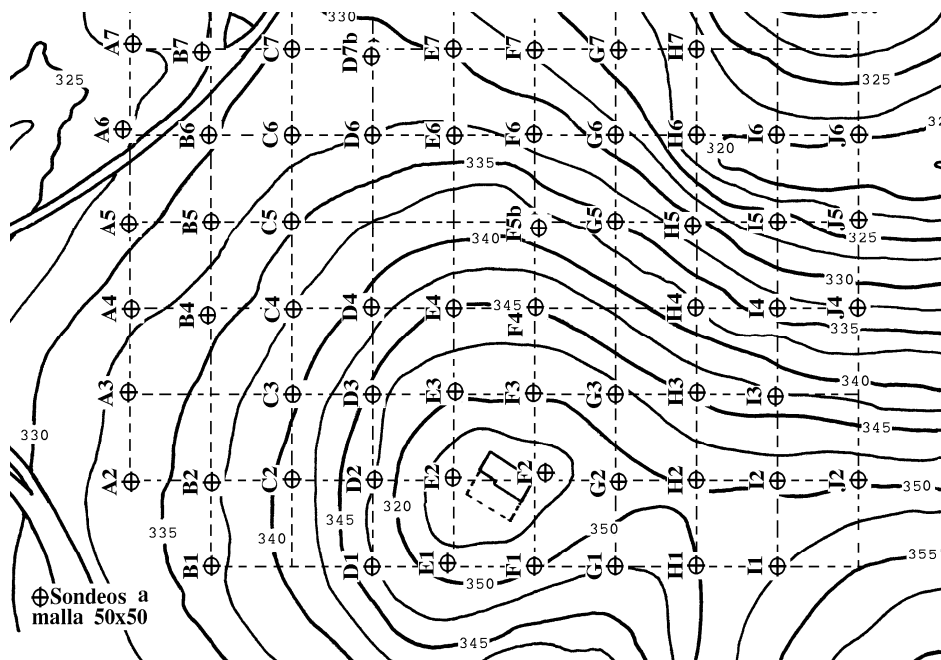


Fig. 15.3. Malla de sondeos de investigación

Antes de perforar cada sondeo, su situación teórica dentro de la malla debe replantearse y marcarse en el terreno, siguiendo los procedimientos clásicos de replanteo de puntos y alineaciones rectas, con apoyo en la red de vértices trigonométricos y topográficos. Los sondeos se realizan sobre el terreno virgen por lo que, en muchos casos, los accidentes del mismo impiden que la máquina sondeadora se posicione exactamente sobre el punto replanteado. Una vez efectuado cada sondeo es preciso levantar su situación real, por intersección o itinerario.

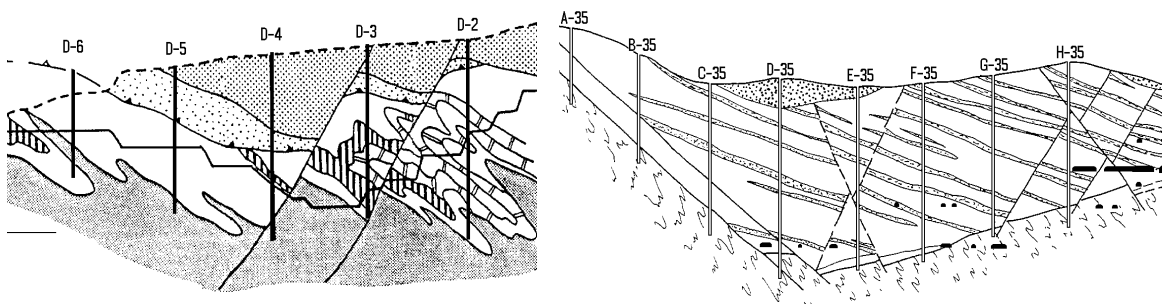


Fig. 15.4. Cortes geológicos

Una vez finalizada la campaña se elabora una cartografía geológica local, completada por el levantamiento de fallas, afloramientos, etc. Finalmente se realiza un modelo geológico tridimensional, integrando toda la información geológica y topográfica. Este modelo se materializa en una serie de secciones paralelas y equidistantes, que pueden ser horizontales o verticales (figura 15.4).

### 15.3.2.- Modelización y diseño de la explotación

La siguiente fase consiste en la elaboración de un modelo completo del yacimiento, integrando la información geológica, análisis de muestras de sondeos, tests mineralúrgicos y otros datos de interés, además de la información topográfica.

La tendencia actual (figura 15.5) es utilizar modelos numéricos (o discretizados) dividiendo el yacimiento en bloques de base cuadrada o rectangular y de altura igual a la de banco, definidos por las coordenadas espaciales de sus centros y cuyos parámetros (leyes, leyes recuperables, potencias, etc.) se estiman, a partir de la información de los sondeos, por procedimientos matemáticos o geomatemáticos con ayuda del ordenador. Las dimensiones y la orientación de la malla de bloques dependerán de las de la malla de sondeos y de las características del yacimiento (tamaño, continuidad, etc. de los cuerpos mineralizados).

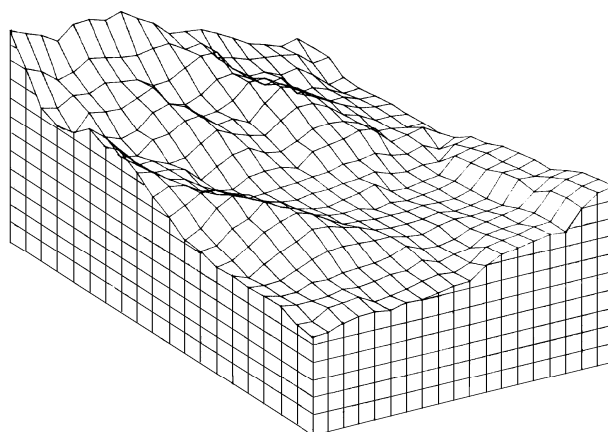


Fig. 15.5. Modelo de bloques

Con modelos de este tipo resulta muy adecuado disponer de la topografía superficial en un formato similar, lo que nos lleva a la elaboración de un modelo digital de elevaciones (MDE, figura 15.6) basado en una red de puntos que coincidirá, en planta, con la de bloques del modelo del yacimiento o será un submúltiplo de ella.

<b>Modelo del yacimiento</b>	<b>Modelo topográfico</b>
Morfológico	Continuo (curvas de nivel)
Numérico	Numérico (MDE)

Normalmente, las direcciones del MDE y las de la red de bloques se harán coincidir con las direcciones principales de la malla de sondeos de investigación. En esta etapa es frecuente trabajar en coordenadas locales, con ejes cartesianos paralelos a estas direcciones principales.

El diseño del vaso de explotación y de los accesos se hará por procedimientos que pueden ir desde los puramente automáticos (algoritmos matemáticos) a los manuales y se basan en criterios económicos y mineros. Se obtendrá una serie de diseños, de entre los cuales se elige el más conveniente. El

diseño del vaso debe repercutirse hasta la superficie del terreno, para determinar su intersección con ella y el volumen total de tierras a extraer. Dentro de cada proyecto se calculan los tonelajes de mineral y estéril. La cubicación se efectuará por procedimientos automáticos (conteo de bloques) o manuales (sobre secciones verticales o sobre curvas de nivel).

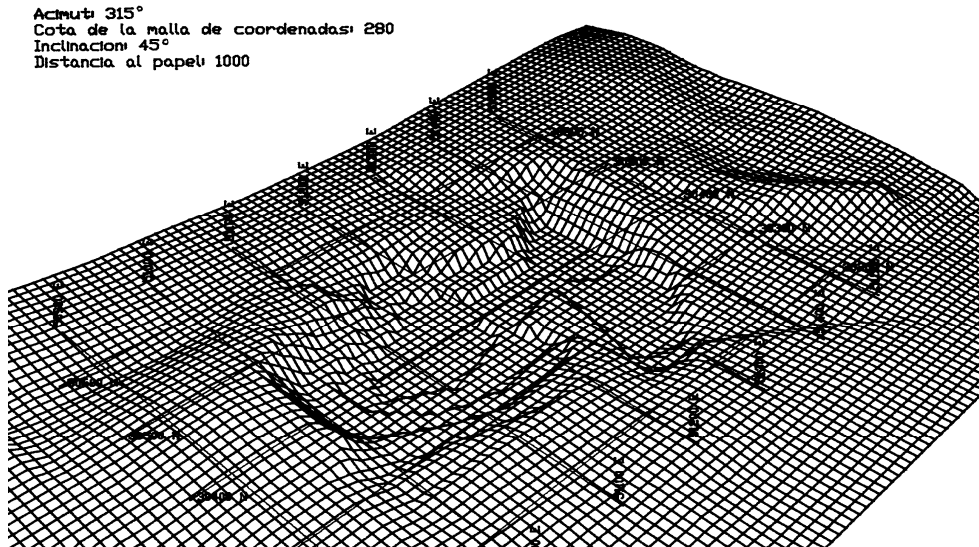


Fig. 15.6. Representación de un modelo digital del terreno

El diseño de vertederos, por su parte, supone:

- Elegir su ubicación: Se aplican criterios económicos y medioambientales.
- Calcular su capacidad.
- Diseñar el sistema de vertido, los accesos, etc.

Los planes de restauración también se elaboran en esta etapa. Los trabajos de restauración no van a ponerse en marcha cuando se agote el yacimiento sino, preferiblemente, en paralelo a la marcha de la mina. Se basan en la cartografía inicial y en el diseño del vaso y de los vertederos y suponen:

- Relleno de huecos de la explotación.
- Suavizado de taludes en corta y vertederos.
- Infraestructuras, etc.

El proyecto debe estudiarse cuidadosamente para minimizar impactos, no sólo cuando termine la explotación sino también durante la vida de la misma. Los planes de restauración suelen plasmarse sobre planos a distintas escalas, pero también se emplean otros soportes: planos-esquema mostrando las fases del plan, ortofotos, maquetas, etc.

### **15.3.3.- Proyectos de instalaciones, accesos, transportes, líneas eléctricas**

Se trata de proyectos puntuales aunque, con frecuencia, de gran envergadura. Se apoyan en levantamientos topográficos a distintas escalas e implican a técnicos de distintas especialidades, según su naturaleza. Puede tratarse de instalaciones nuevas o de modificación de otras ya existentes.



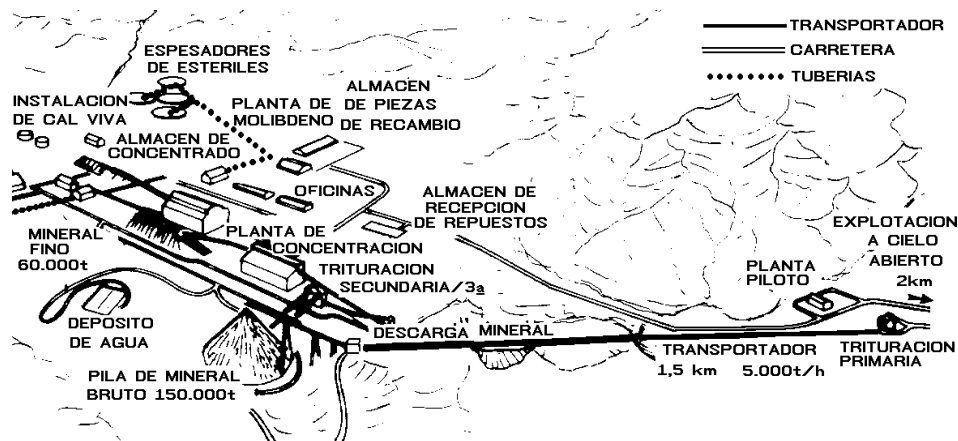


Fig. 15.7. Instalaciones de una mina de cobre

Los trabajos topográficos necesarios son los propios de cualquier proyecto de ingeniería civil: levantamientos, replanteos, nivelaciones, etc.

#### 15.4.- TRABAJOS TOPOGRÁFICOS EN LA FASE DE PRODUCCIÓN

Estos trabajos suelen tener un carácter sistemático y una periodicidad fija, que depende de las características de la explotación. El factor tiempo suele tener una importancia grande.

##### 15.4.1- Levantamiento de frentes de trabajo y vertederos

Suele realizarse mensualmente, coincidiendo con el fin de mes y, por tanto, con los trabajos de planificación a corto plazo de la explotación minera. El levantamiento de frentes constituye una operación crítica, ya que:

- Existe una importante limitación de tiempo: Se realizan en momentos muy concretos y en poco tiempo, ya que suelen condicionar la planificación a corto plazo.
- No deben alterar el ritmo de producción. Esto puede presentar problemas en frentes que estén activos en el momento de realizar el levantamiento.

Estos trabajos deben planificarse cuidadosamente, comprobando que toda la infraestructura topográfica necesaria (vértices) está operativa y estableciendo los apoyos topográficos necesarios en cada caso. La organización de los trabajos se hará con pocos días de antelación, ya que sólo entonces puede conocerse cuál va a ser la situación aproximada de frentes y vertederos y cuáles van a ser, por tanto, las necesidades en cuanto a infraestructuras topográficas.

Las escalas suelen oscilar entre  $1:2.500$  y  $1:500$ , dependiendo de la utilización que vaya a darse a los planos obtenidos. Se han descrito distintas formas de realizar estos trabajos, entre ellas:

- Taquimetría, con itinerarios encuadrados aproximadamente paralelos al frente y situados a cierta distancia del mismo. Las estaciones extremas estarán marcadas en el terreno y se habrán levantado previamente (normalmente, por intersección). Las estaciones del itinerario pueden estar

marcadas de antemano y servirán para levantar por radiación los puntos de interés. Se levantan puntos de la cabeza y el pie del banco. Si el avance es reducido, se puede levantar desde una sola estación.

- Fotogrametría terrestre: Las bases se sitúan fuera de la zona de actividad y se levantan con antelación. Las señales se colocan en el momento de tomar los fotogramas y se levantan desde los puntos de la base. Por este sistema se pueden trazar curvas de nivel, además de las líneas de cabeza y pie de banco.
- Sistemas GNSS: La medición de los puntos de interés se realiza de la forma habitual o completando, incluso sustituyendo, la red de satélites GNSS por estaciones fijas situadas en puntos bien elegidos de la explotación.

Los resultados se emplean para cubicar los volúmenes de mineral y estéril extraídos, pero también para actualizar los planos sobre los que se realiza la planificación a corto plazo y que sirven de guía para la operación minera. En estos planos se incorpora la información geológico-minera del control de leyes o del proyecto. También se emplean para actualizar el inventario de reservas y para otros tipos de aplicaciones (figura 15.8).

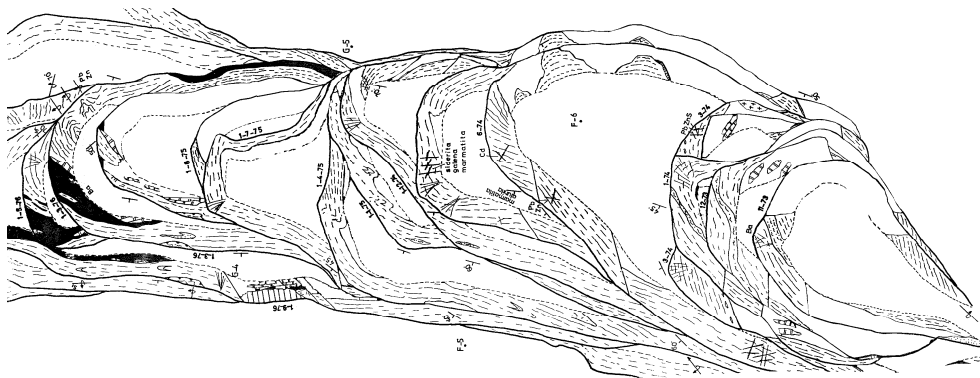


Fig. 15.8. Evolución de los frentes de una corta (SMMPE)

#### 15.4.2- Sondeos de control de leyes. Barrenos de voladura

En muchas explotaciones se precisa un control geológico-minero más preciso que el que proporciona el proyecto, lo que obliga a efectuar sondeos de control de leyes, a malla más cerrada que la de investigación y submúltiplo de ella. Estos sondeos se perforan una vez retirado el estéril de recubrimiento, por lo que no suele haber problemas para situarlos exactamente en sus posiciones teóricas. La malla de sondeos se replantea y se marca sobre el terreno, empleando los métodos ya conocidos.

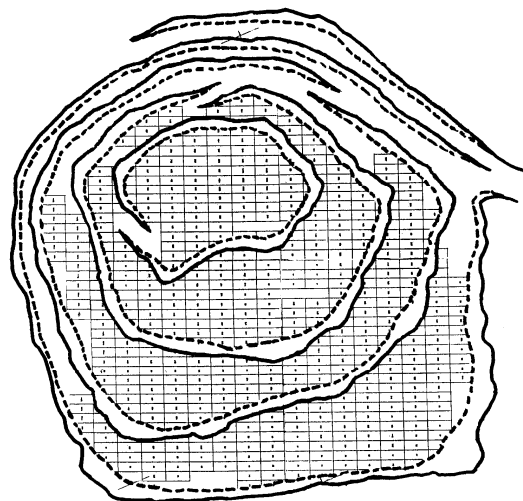


Fig. 15.9. Bloques de control de leyes

En otros casos es suficiente con analizar los detritos de los barrenos de voladura. Esto supone levantar topográficamente la situación de cada barreno, operación para la que se suele disponer de poco tiempo.

En ocasiones se marcan sobre el terreno los barrenos, según su malla teórica, para facilitar el control de las voladuras. Esto supone levantar previamente el frente y replantear la malla según la forma del mismo. En el caso de barrenos inclinados conviene marcar la situación del barreno y una línea perpendicular al frente (por cada barreno) que permita a la máquina perforadora posicionarse correctamente.

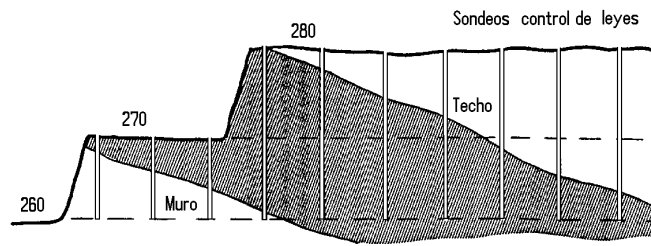


Fig. 15.10. Sondeos de control de leyes

que permita a la máquina perforadora posicionarse correctamente.

A partir de los análisis realizados sobre muestras de sondeos de control de leyes o de barrenos se determinan, sobre plano, las separatrices entre zonas de mineral y de estéril. En ocasiones, estas líneas se marcan sobre el terreno, para facilitar la tarea del equipo de producción y evitar pérdidas y polución del mineral. También en este caso son de aplicación las técnicas de replanteo.

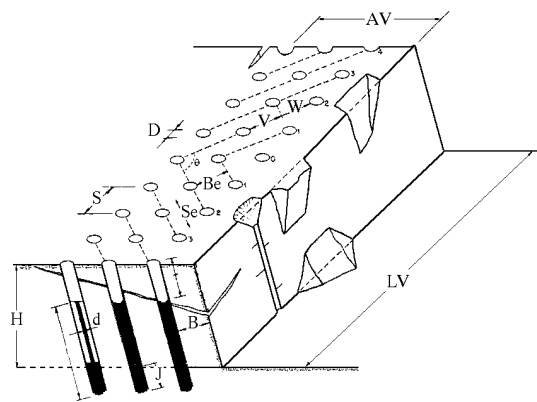


Fig. 15.11. Barrenos

### 15.4.3- Control de estabilidad de taludes

Además de los controles de tipo geotécnico, interesa en ocasiones efectuar un seguimiento de los posibles movimientos en los taludes de la explotación. Se emplean los métodos de intersección y trilateración para el levantamiento de puntos aislados del talud o la fotogrametría terrestre para el levantamiento del talud completo.

Los métodos de micro-geodesia permiten precisiones muy superiores, pero la fotogrametría permite levantar el talud completo, lo que a veces es muy conveniente. En caso necesario, ambas técnicas pueden combinarse entre sí. La frecuencia y el tipo de controles vendrán definidos por las características del talud a controlar, por la precisión requerida y por los equipos disponibles.

### 15.4.4- Nivelación de plantas

La planificación minera se basa en las plantas teóricas de trabajo, en las que se habrá determinado cuáles son las zonas de mineral y de estéril. La explotación debe seguir estas plantas sin grandes desviaciones, ya que lo contrario supondrá una contaminación del mineral con estéril y una pérdida de reservas, al enviar erróneamente parte del mineral al vertedero.

En el caso de que existan minados en la zona, como resultado de una mina subterránea ya abandonada (figura 15.12), los trabajos de nivelación son fundamentales para poder situar los huecos con precisión y reducir el riesgo de accidentes.

Para evitar todos estos problemas conviene realizar una nivelación periódica de las plantas de trabajo a medida que avanzan los frentes. En algunos casos basta con una nivelación trigonométrica realizada junto con el levantamiento mensual de los frentes, pero en otros será necesario efectuar nivelaciones geométricas, incluso después de cada voladura, para corregir las posibles desviaciones en la voladura siguiente.

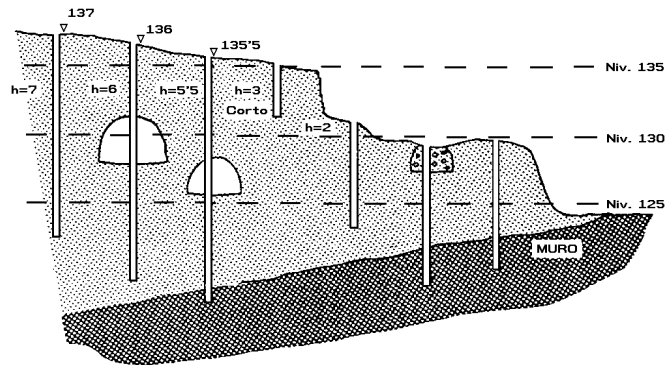


Fig. 15.12. Detección de minados

#### 15.4.5- Restauración

Además de elaborar los planes de restauración, que es una de las etapas del proyecto, es preciso realizar un seguimiento topográfico de la ejecución de los mismos.

En ocasiones, cambios en las condiciones de la explotación, como el descubrimiento de nuevas zonas mineralizadas, obligarán a actualizar y completar estos planes. En todos los casos, el equipo topográfico de la explotación minera jugará un papel importante en esta fase.

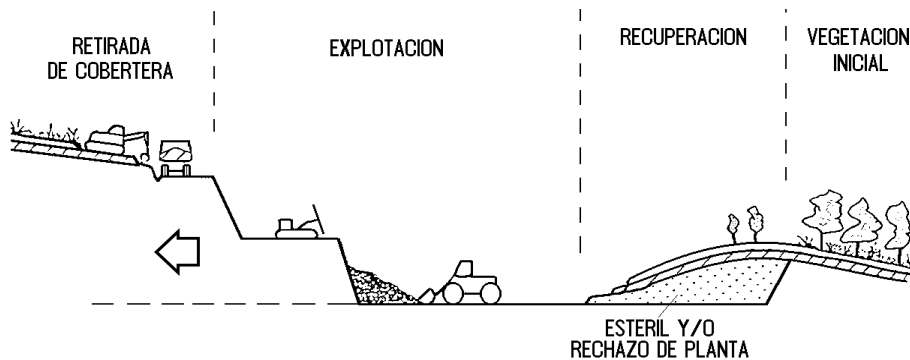


Fig. 15.13. Restauración de terrenos

## **16. HUNDIMIENTOS MINEROS**

### **16.1. INTRODUCCIÓN**

El titular de una explotación subterránea es responsable de las repercusiones que la actividad minera pueda producir en edificaciones, infraestructuras, etc. situadas en superficie. Los hundimientos y sus repercusiones en superficie dependen de muchos factores: geometría de la explotación minera, profundidad de las labores, naturaleza de los terrenos atravesados, etc. Por eso, prever cuáles serán los efectos que va a provocar una futura explotación puede resultar muy complicado.

En cualquier caso, una vez producido un hundimiento será necesario cuantificarlo e intentar relacionarlo con los trabajos de interior para delimitar las responsabilidades y las correspondientes indemnizaciones, especialmente en zonas en las que existan varias explotaciones mineras próximas.

### **16.2. NATURALEZA DE LOS DAÑOS**

Los terrenos permeables suelen sufrir pocos efectos. En los poco o nada permeables se forman depresiones en las que pueden producirse inundaciones que los hacen inadecuados para la agricultura.

Las edificaciones muestran grietas que pueden ser importantes y provocar el derrumbamiento de techos y muros.

Las vías de comunicación pueden presentar variaciones importantes en su perfil longitudinal. Se producen movimientos y roturas de losas y pavimentos, así como alteraciones en los sistemas de drenaje. Los efectos pueden ser muy importantes en vías férreas.

Las canalizaciones pueden llegar a romperse o, en otros casos, ser movidas o empujadas fuera del suelo por compresión horizontal.

### **16.3. MOVIMIENTOS DEL TERRENO DEBIDOS A UNA EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA**

Los movimientos en superficie, motivados por una explotación subterránea, pueden provocar problemas considerables, afectando a edificios e infraestructuras, creando depresiones donde se acumulan las aguas de aluvión o desecando los terrenos afectados.

Las repercusiones dependen de las condiciones de la explotación, de la profundidad y de las características geológicas de los terrenos afectados. En yacimientos estratificados, en capas de gran potencia o en el caso de rocas encajantes poco competentes, los efectos serán grandes; en capas de poca potencia, a gran profundidad o en el caso de rocas competentes, los efectos serán pequeños o nulos. Los movimientos pueden ser complejos y las zonas más críticas corresponden, en superficie, a los bordes del área afectada.

Supongamos una capa de carbón explotada por el método de hundimientos, en la que los huecos creados por la explotación se rellenan con materiales desprendidos del techo de la capa. Si el esponjamiento de los materiales desprendidos es de  $1,4$ , el hueco que producen será igual al vacío inicial dividido por este valor. El nuevo hueco se rellenará, a su vez, con nuevos materiales desprendidos, siguiendo esta misma regla. El hundimiento irá progresando, de manera que el volumen total de terreno desprendido será la suma de los términos de una progresión geométrica decreciente e ilimitada, cuyo primer término es el hueco inicial y donde la razón de decrecimiento es la relación  $1/1,4$ .

La zona hundida tendrá una forma irregular, que podemos asimilar a la de una pirámide cuya base será el hueco inicial. Si las labores subterráneas se encuentran a una profundidad  $h$  inferior a la altura de esta pirámide, el hundimiento se declarará en superficie bruscamente, con una forma parecida a la de un cono invertido (figura 16.1).

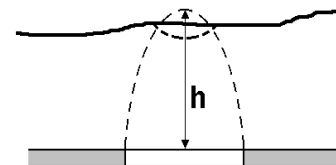


Fig. 16.1. Forma de la zona hundida (1)

Si las labores se encuentran a una profundidad superior a  $h$  el hundimiento se manifestará en forma de artesa  $abcd$  (figura 16.2). Si la altura es grande los efectos pueden tardar varios años en manifestarse. El hundimiento irá progresando con el tiempo y la artesa irá creciendo en profundidad y extensión hasta que se restablezca el equilibrio de los terrenos afectados. Las zonas críticas corresponden, precisamente, a los bordes de la artesa, en los que los terrenos pueden perder la horizontalidad y los efectos sobre las construcciones situadas en superficie serán máximos.

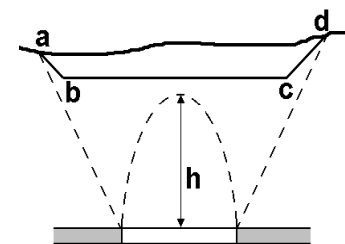


Fig. 16.2. Forma de la zona hundida (2)

La zona afectada por el hundimiento tendrá una superficie mayor que la proyección horizontal de la labor minera que lo provoca. Aparecerán efectos de tracción (desgarramiento) hacia los bordes de la zona y efectos de compresión en su parte central. Las rectas que unen los puntos del límite de la labor con los correspondientes del límite de la zona afectada forman, con un plano horizontal, el llamado *ángulo límite*. Las

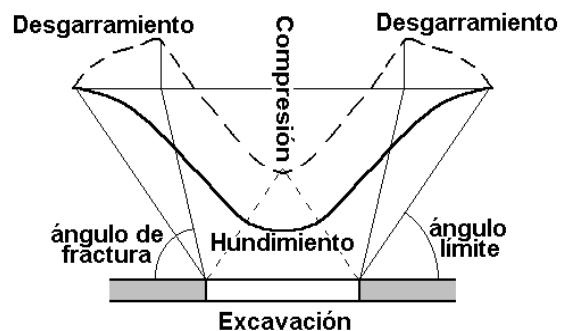


Fig. 16.3. Características del hundimiento (1)

rectas que unen los puntos límite de la explotación con aquellos de la superficie en que se producen los máximos efectos por desgarramiento forman, con un plano horizontal, el llamado *ángulo de fractura* (figura 16.3).

Las características del hundimiento van a depender de la profundidad de la labor y del valor del ángulo límite. Si al llevar los ángulos límite desde los extremos de nuestra labor hacia el interior de la zona afectada las rectas correspondientes se cortan por debajo de la superficie del terreno, nos encontramos en el caso de la figura 16.3. En los bordes de la zona afectada dominan los efectos de desgarramiento, mientras que en el interior dominan los de compresión y algunos movimientos laterales.

Si las rectas se cortan justo en la superficie del terreno (figura 16.4), se tendrá una cubeta de hundimiento con efectos de desgarramiento similares a los del caso anterior pero con una zona central mayor y en la que se darán efectos de compresión menos acusados.

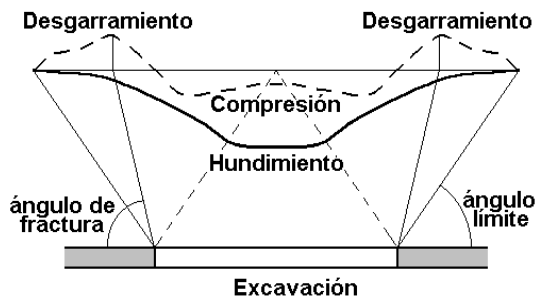


Fig. 16.4. Características del hundimiento (2)

Cuando las rectas se cortan por encima de la superficie del terreno (figura 16.5), los efectos de desgarramiento y compresión se limitarán a los bordes de la zona afectada, mientras que la zona central sufrirá un hundimiento uniforme y no se verá sometida a movimientos laterales.

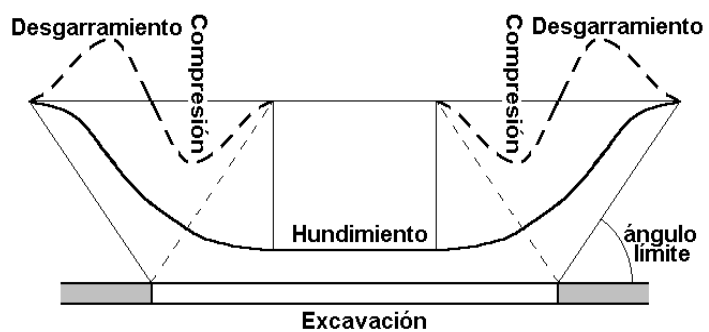


Fig. 16.5. Características del hundimiento (3)

Las observaciones realizadas en hundimientos mineros confirman que las deformaciones producidas tienen un comportamiento similar al de un material deformable sometido a cargas. Aunque los valores obtenidos en cada caso dependerán de las condiciones particulares del mismo, la forma de estos diagramas de deformación es siempre idéntica.

Si representamos en el eje vertical las deformaciones producidas y en el horizontal el tiempo transcurrido hasta que se produce la deformación, obtendremos un diagrama similar al de la figura 16.6. La curva presenta una asíntota horizontal que corresponde al hundimiento máximo y, por tanto, al restablecimiento del equilibrio en los terrenos.

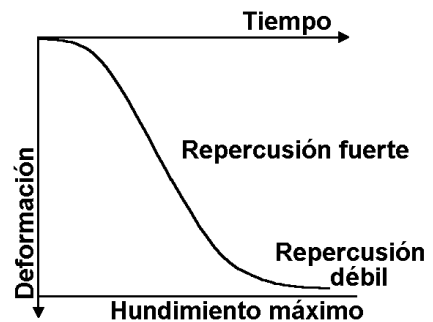


Fig. 16.6. Deformaciones / tiempo

Al principio, durante un periodo que puede alcanzar varios meses, los movimientos son imperceptibles. A continuación aparece un periodo de repercusión fuerte, que puede durar varios años. Le sigue un periodo de débil repercusión que puede llegar a durar centenares de años, hasta que el hundimiento alcanza su forma definitiva. La forma en que evolucionan los hundimientos con el tiempo ha de tenerse en cuenta a la hora de reparar los daños causados en superficie, ya que, en tanto no se alcance la fase de débil repercusión, pueden seguir produciéndose efectos.

#### 16.4. CÁLCULO DE HUNDIMIENTOS Y MACIZOS DE PROTECCIÓN

Muchas empresas mineras han desarrollado métodos empíricos para prever los efectos de los hundimientos mineros. Estos métodos están basados en la experiencia y pueden proporcionar buenas estimaciones, a condición de que se apliquen en condiciones similares a aquellas para los que fueron desarrollados. Por desgracia, como hemos visto, los efectos de los hundimientos dependen, en gran medida, de estas condiciones. La existencia de discontinuidades geológicas, además, puede invalidar los resultados de cualquiera de estos métodos.

También se han propuesto métodos analíticos, a partir del desarrollo de la Mecánica de Rocas, en los que no entramos por no ser objeto de nuestra materia.

Robert Taton, en su libro *Topografía Subterránea*, proponía un método empírico de cálculo que denomina *método de trazado teórico*. El autor supone que la zona afectada corresponderá, aproximadamente, a la forma de una pirámide invertida. Desde los extremos de la labor minera se trazan unos planos con una inclinación de  $30^\circ$ , respecto a la vertical, para los terrenos primarios y de  $45^\circ$  para los terrenos recientes. La intersección de estos planos con el terreno nos determinará la posible área de influencia del hundimiento. El efecto máximo en superficie puede calcularse mediante la expresión:

$$d = \frac{k a p}{\cos i}$$

donde  $i$  es la inclinación de la labor respecto a la horizontal,  $k$  es un coeficiente variable de 0 a 1 según la profundidad,  $a$  es un coeficiente de reducción de las capas y  $p$  es la potencia de las mismas.

Luis Fernández, en su libro *Topografía Minera*, propone un método contrastado por su experiencia en la empresa Duro-Felguera. Se basa en una tabla en la que se entra con la inclinación  $i$  de la labor respecto a la horizontal y se obtienen los valores de los ángulos límites  $A$  y  $B$ .

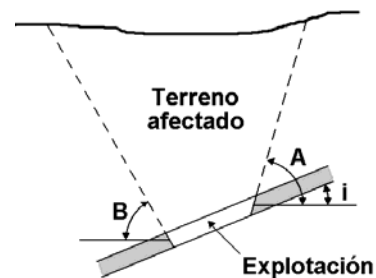


Fig. 16.7. Zona de influencia (ángulos límite)



Inclinación $i$	$A$	$B$
$0^{\circ}$	$70^{\circ}00'$	$70^{\circ}00'$
$10^{\circ}$	$72^{\circ}30'$	$67^{\circ}30'$
$20^{\circ}$	$74^{\circ}45'$	$65^{\circ}15'$
$30^{\circ}$	$77^{\circ}00'$	$63^{\circ}00'$
$40^{\circ}$	$78^{\circ}45'$	$61^{\circ}15'$
$50^{\circ}$	$79^{\circ}45'$	$60^{\circ}15'$
$60^{\circ}$	$79^{\circ}30'$	$60^{\circ}30'$
$70^{\circ}$	$78^{\circ}00'$	$62^{\circ}00'$
$80^{\circ}$	$74^{\circ}45'$	$65^{\circ}15'$
$90^{\circ}$	$70^{\circ}00'$	$70^{\circ}00'$

La zona de influencia se determina teniendo en cuenta que  $A$  es el ángulo límite que corresponde al punto más alto de la explotación y  $B$  el que corresponde al punto más bajo. Estos valores se trazan sobre secciones verticales del yacimiento, tal como se muestra en la figura, y nos permitirán prever la zona afectada por nuestra explotación o si un determinado punto de la superficie está situado dentro de esta zona.

El mismo método puede emplearse para determinar el macizo de protección (parte del yacimiento que se deja sin explotar) para evitar efectos en determinadas zonas de la superficie que se desea proteger. Como antes, lo aplicaremos gráficamente sobre secciones verticales del yacimiento.

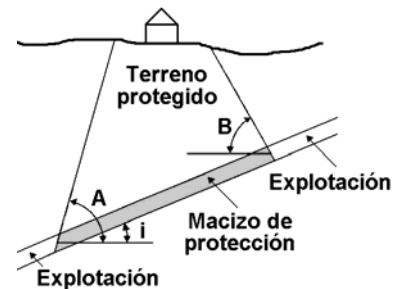


Fig. 16.8. Macizo de protección

### 16.5. CONTROL TOPOGRÁFICO DE HUNDIMIENTOS MINEROS

El seguimiento topográfico de las deformaciones puede hacerse a partir de puntos materializados en el terreno y cuyas coordenadas  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  se han medido con la máxima precisión. Estos puntos se marcan y se miden antes de que comience la explotación y deben situarse fuera del área de influencia de la misma. A partir de esos puntos se miden las coordenadas de una serie de referencias fijas, situadas dentro de la posible zona de influencia. La coordenada  $Z$  es especialmente importante, por lo que conviene determinarla a partir de nivelaciones geométricas de precisión. La medición se puede repetir con cierta frecuencia, para detectar si se han producido movimientos.

Si empiezan a manifestarse los efectos de un hundimiento, se repetirán las mediciones con mayor frecuencia y siempre apoyándonos en los puntos exteriores, que no sufrirán deformación. Podemos determinar así, y trazar, las curvas de igual hundimiento, que nos determinarán los límites del área afectada y las zonas de mayor deformación.

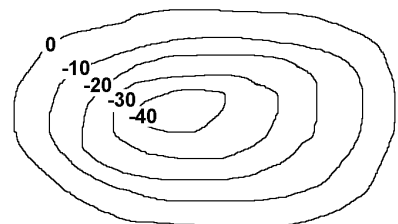


Fig. 16.9. Control topográfico (1)

Es importante realizar un control de deformaciones en el interior de las labores para intentar correlacionar los movimientos exteriores con los de interior. Existe, además de los métodos topográficos, una gran variedad de técnicas para controlar las deformaciones en techos, muros y columnas.

Si se sospecha que puedan superponerse los efectos de dos explotaciones mineras próximas, conviene trazar conjuntamente las curvas de igual deformación correspondientes a ambas explotaciones. Las zonas que se sitúan en la intersección de los dos sistemas de curvas estarían afectadas por ambas explotaciones y la responsabilidad de los daños producidos en esas zonas debe compartirse.

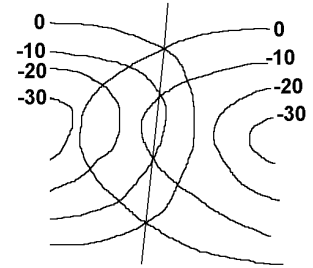


Fig. 16.10. Control topográfico (2)

## 17. INTRUSIÓN DE LABORES.

### 17.1.- INTRODUCCIÓN

Se conoce por *intrusión* el hecho de que en una explotación minera, a cielo abierto o subterránea, se realicen indebidamente labores fuera del perímetro de sus concesiones. Cuando la intrusión se produce en un terreno franco, que no pertenece a otro concesionario, el explotador suele solicitar a la Administración la concesión de ese nuevo terreno, generalmente en forma de demasía. En este caso, el problema se resolvería legalizando la situación del terreno. Si la intrusión se produce en una concesión colindante otorgada a otro concesionario, el responsable deberá indemnizarlo por el mineral que se haya extraído indebidamente y también por los perjuicios que se haya podido ocasionar en el criadero, que dificultan y pueden llegar a imposibilitar la explotación de una parte del mismo.

Para evitar la intrusión es fundamental realizar sistemáticamente el levantamiento de los frentes de trabajo y llevar los planos al día, especialmente cuando se estén explotando zonas próximas al linde de la concesión. En estos planos deben figurar las labores y el perímetro de la concesión minera.

Cuando se sospeche que se ha cometido una intrusión se debe actualizar el levantamiento de todas las labores de la zona. Podremos comprobar así si existe un problema de este tipo y cuál es su magnitud. Asimismo, podremos determinar el correspondiente volumen de mineral, para poder cuantificar las indemnizaciones pertinentes. Este trabajo suelen hacerlo topógrafos de las dos partes afectadas y, en caso necesario, también de la Administración.

El levantamiento de la zona afectada se lleva a un plano donde figuren los límites de las concesiones y, sobre él, se determinan las características de la intrusión.

### 17.2.- TOMA DE DATOS

Los datos correspondientes a los límites de los registros mineros afectados se conocen de antemano. Se debe disponer de las coordenadas UTM de cada una de las esquinas del perímetro de éstas.

El levantamiento de las labores en que se ha producido la intrusión se realiza tal como se explicó en los capítulos precedentes. Como hemos indicado, conviene calcular las coordenadas UTM de tantos puntos como sea necesario para poder calcular el volumen de material extraído.

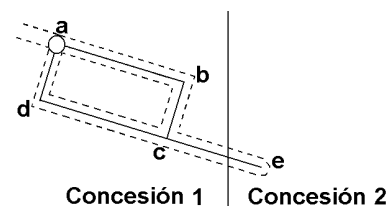


Fig. 17.1. Intrusión de labores

Para ello, relacionamos el levantamiento con las coordenadas de la red topográfica de la explotación, que, a su vez, estará relacionada con la red geodésica. A partir de las coordenadas de todos estos puntos podremos realizar los cálculos oportunos.

Así, a partir del itinerario de interior *abcd* de la figura 17.1 se podría levantar toda la labor *c-e*, una parte de la cual corresponde a la intrusión.

### 17.3.- CÁLCULO DE LA INTRUSIÓN

#### 17.3.1.- Intrusión de labores subterráneas

En primer lugar, representamos los datos del levantamiento de labores en el plano de concesiones, para confirmar que se ha producido la intrusión.

Supongamos conocidas las coordenadas de los puntos *P* y *P'* del perímetro de la concesión en la zona de la intrusión (figura 17.2). Supongamos también conocidas las coordenadas de los puntos *c* y *e*, el segundo de los cuales es exterior a dicho perímetro. Vamos a calcular las coordenadas del punto *i*, a partir del cual empieza la intrusión.

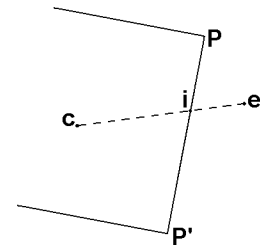


Fig. 17.2. Cálculo de la intrusión

Este punto corresponde a la intersección de las rectas *P-P'* y *c-e*. Calculados los acimutes  $\theta_P^{P'}$  y  $\theta_c^e$  de ambas, será:

$$X_i = X_c + D_{ci} \operatorname{sen} \theta_c^e = X_P + D_{Pi} \operatorname{sen} \theta_P^{P'}$$

$$Y_i = Y_c + D_{ci} \operatorname{cos} \theta_c^e = Y_P + D_{Pi} \operatorname{cos} \theta_P^{P'}$$

Procediendo como en 13.3.1., llegamos a:

$$D_{Pi} = \frac{Y_c - Y_P + (X_P - X_c) \cot g \theta_c^e}{\cos \theta_P^{P'} - \cot g \theta_c^e \operatorname{sen} \theta_P^{P'}}$$

Conocida la distancia  $D_{Pi}$  calculamos las coordenadas de *i* y la longitud del tramo *i-e* correspondiente a la intrusión.

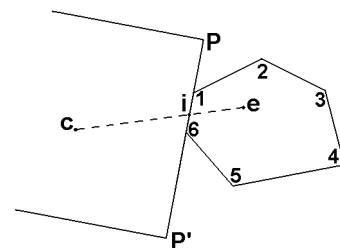


Fig. 17.3. Intrusión: labores de interior

Para calcular el volumen de tierras correspondiente a la intrusión habremos determinado, desde *c* y *e*, las coordenadas *X*, *Y* y *Z* de un número suficiente de puntos.

Con estos datos trazaremos una serie de perfiles, horizontales o verticales, y calcularemos el volumen de tierras aplicando el método de los perfiles. En caso necesario, habrá que tomar los datos suficientes para realizar por separado el cálculo de los volúmenes de mineral y de estéril.

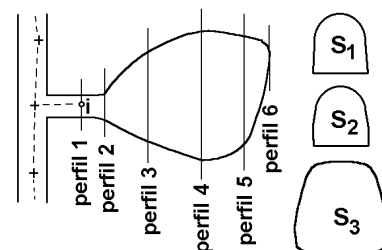


Fig. 7.4. Cubicación: labores de interior

Para calcular la superficie horizontal comprendida entre los puntos 1, 2 ... 6, también se puede aplicar la expresión:

$$S = \left| (X_1 - X_2) \frac{Y_1 + Y_2}{2} + (X_2 - X_3) \frac{Y_2 + Y_3}{2} + \dots + (X_6 - X_1) \frac{Y_6 + Y_1}{2} \right|$$

### 17.3.2.- Intrusión de labores a cielo abierto

El levantamiento de las labores de la zona afectada se hace de la forma que ya conocemos. Los datos correspondientes se llevan al plano que representa los límites del perímetro del registro minero, para determinar si ha habido intrusión.

En este caso, para determinar el movimiento de tierras que se ha efectuado, tendremos que tener en cuenta la topografía inicial de la zona afectada. Si hemos medido un número suficiente de puntos, podremos realizar la cubicación por el método de los perfiles. Se trata de calcular el volumen de tierras, exterior al perímetro de la concesión, comprendido entre la topografía inicial y las labores realizadas.

Es posible que una parte significativa de estas tierras sea estéril y no corresponda indemnización por ella. Para determinar el volumen de mineral habrá que reconstruir, sobre el plano, la forma del cuerpo mineralizado, su potencia, etc. Para ello, cuando se realice el levantamiento de los frentes conviene levantar también las separatrices entre mineral y estéril que sean visibles en ellos, de forma que el cálculo del movimiento de tierras se pueda hacer con más exactitud.

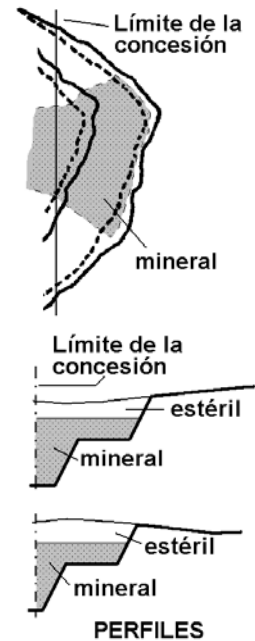


Fig. 17.5. Cubicación: cielo abierto

## 18. TOPOGRAFÍA DE TÚNELES

### 18.1.- 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. 18.1. 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:

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

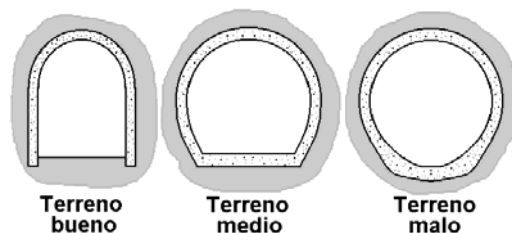


Fig. 18.2. Sección en función del tipo de terreno

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 18.2). Estos factores condicionan, también, el tipo de revestimiento a emplear para que la obra pueda resistir las presiones del terreno.

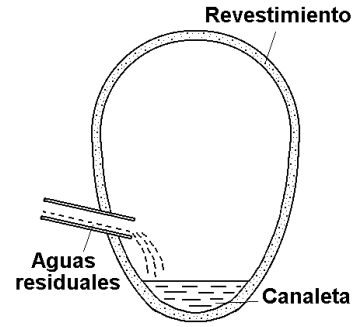


Fig. 18.3. Galería ovoide

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 18.3). Suelen construirse mediante elementos prefabricados de hormigón y, habitualmente, se excavan en zanja.

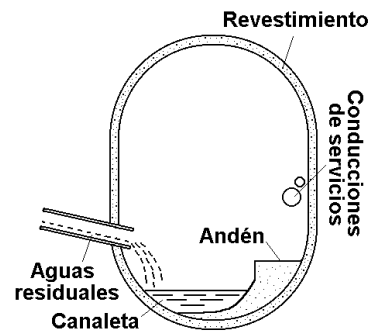


Fig. 18.4. Galería visitable

Las galerías visitables (figura 18.4) 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 18.5). 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.

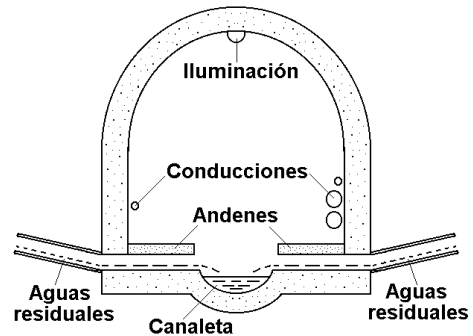


Fig. 18.5. Grandes colectores

Los túneles de carretera o autopista (figura 18.6) 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

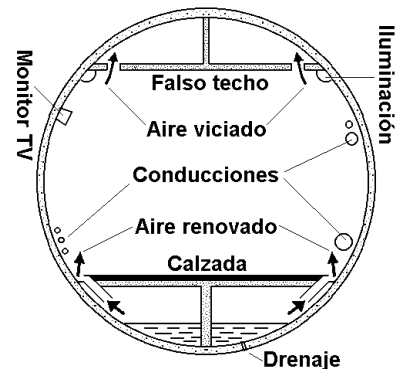


Fig. 18.6. Túnel de carretera

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.

Los túneles para ferrocarril (figura 18.7) 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 18.8).

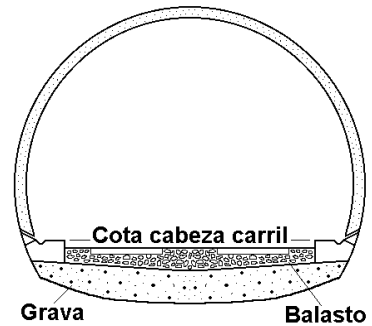


Fig. 18.7. Túnel de ferrocarril

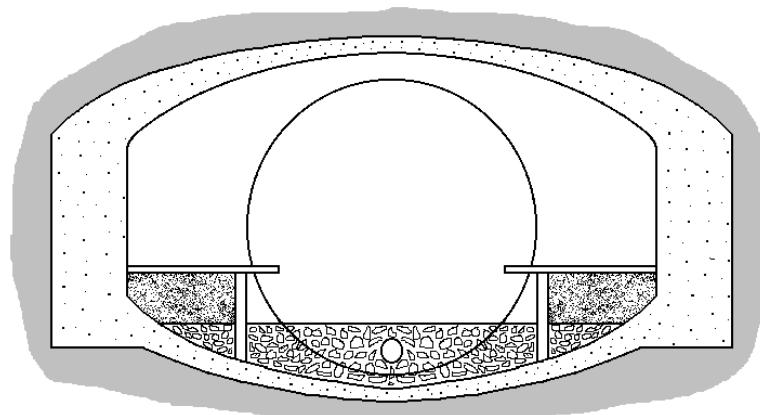


Fig. 18.8. Estación de ferrocarril metropolitano

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 18.9). Para esta función se construyen túneles de sección variable, que siempre van revestidos.

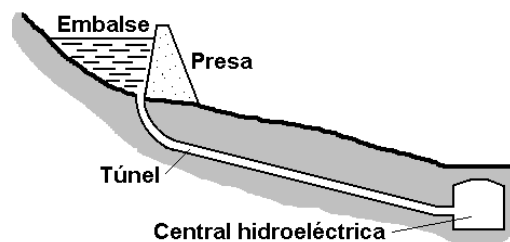


Fig. 18.9. Conducción de agua a presión

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.

## 18.2.- 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 18.10). 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.

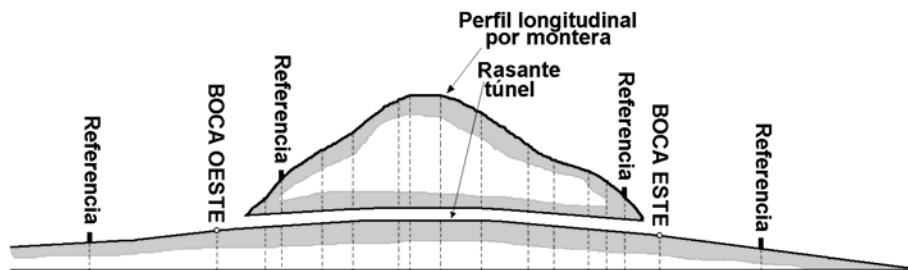


Fig. 18.10. Perfil longitudinal

La perforación del túnel puede realizarse excavando desde uno de sus extremos, únicamente, o desde los dos, simultáneamente (figura 18.11). 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.

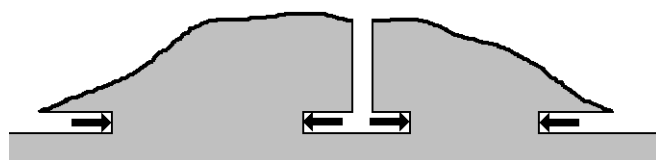


Fig. 18.11. Excavación con varios puntos de ataque

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.

### 18.3.- 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.

#### 18.3.1.- 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.

#### 18.3.2.- 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 18.12). 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. La red se calcula y se compensa de la forma habitual, sirviendo la segunda base como comprobación, y se enlaza con la red geodésica.

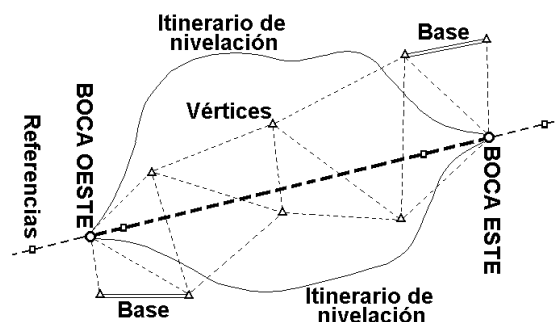


Fig. 18.12. Enlace entre bocas

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 GNSS.

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.

### **18.3.3.- 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.

### **18.3.4.- 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 (REDNAP). 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.

## **18.4.- REPLANTEO DEL EJE DEL TÚNEL**

Una vez realizados los trabajos de enlace entre bocas y el paso de línea 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 replanteo del mismo (figura 18.13). El tercer punto nos servirá como comprobación. A partir de ese momento, el replanteo se realiza empleando las técnicas descritas en los apartados 13.3 y 13.4.

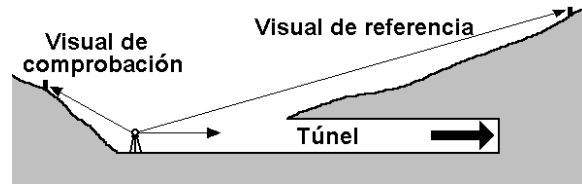


Fig. 18.13. Replanteo del eje

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 señalarse 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 altiméricamente con las bocas extremas del túnel. El pozo se excava hasta la profundidad apropiada, comprobándola mediante las técnicas de medición que se explicaron en 10.3.2 y 10.3.3.

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 12.3. 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 13.

#### **18.5.- 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 18.14).

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.

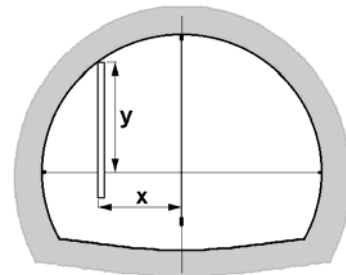


Fig. 18.14. Secciones: abscisas y ordenadas

### 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 18.15). 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.

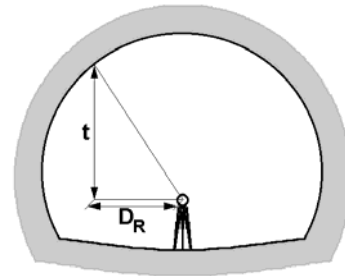


Fig. 18.15. Secciones: radiación

La operación se facilita enormemente usando estaciones totales “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 18.16). También se debe materializar el perfil, por ejemplo mediante un haz láser.

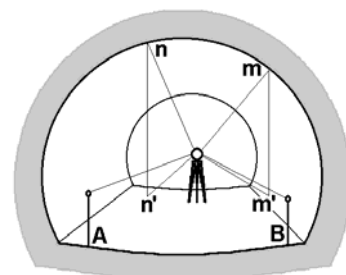


Fig. 18.16. Secciones: medida de ángulos

Para medir puntos del perfil ( $m, n, \dots$ ) 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

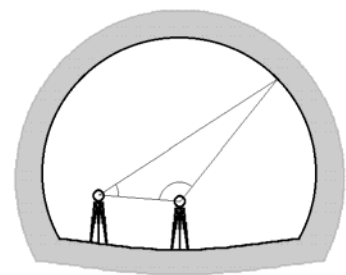


Fig. 18.17. Secciones: intersección

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 18.17).

### **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 18.18).

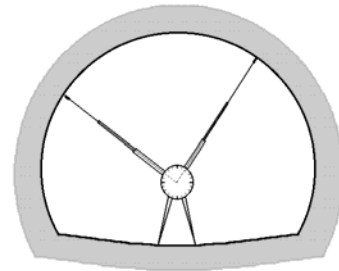


Fig. 18.18. Secciones: pantómetra de túneles

### **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 18.19). Pueden emplearse para túneles de pequeña sección.

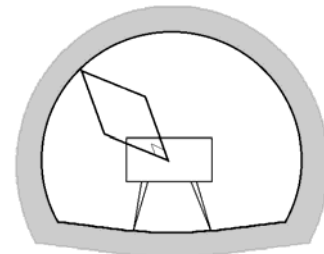


Fig. 18.19. Secciones: pantógrafo

### **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 18.20). Sobre la plataforma lleva una mesa trazadora y dos focos luminosos. En la mesa disponen de dos regletas que se sitúan paralelas a 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.

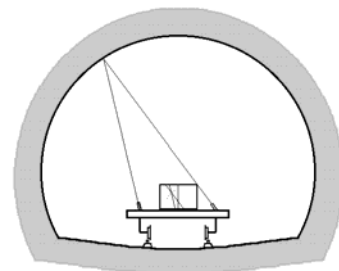


Fig. 18.20. Secciones: perfilógrafo Lechartier

El perfilógrafo Castan (figura 18.21) 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.

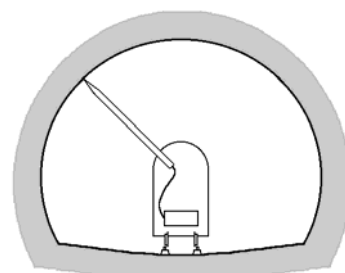


Fig. 18.21. Secciones: perfilógrafo Castan

El perfilómetro Prota (figura 18.22) 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 cenitales.

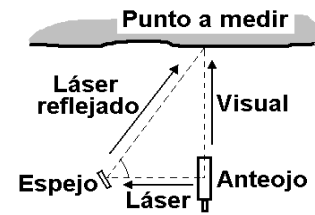


Fig. 18.22. Secciones: perfilógrafo Protá

### **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.

### **Mediante láser-scanner**

Es un equipo capaz de, una vez estacionado en un punto conocido, medir varios miles de puntos por segundo mediante un escaneado láser. Esto permite generar una nube de puntos 3D del objeto estudiado.