

9. LA TOPOGRAFÍA SUBTERRÁNEA. JUSTIFICACIÓN

NOTA: En los capítulos precedentes hemos visto la diferencia entre *orientación* y *acimut* y la forma de trabajar con cada uno de estos valores. No obstante, en lo que sigue y dado que en Topografía es habitual hacerlo de esta forma, emplearemos el término *acimut* en el sentido de: *ángulo horizontal que forma una alineación con el Norte de la cuadrícula UTM, medido desde éste y en sentido horario.*

9.1.- INTRODUCCIÓN

En los capítulos que siguen se estudia la aplicación de las técnicas topográficas al caso de trabajos desarrollados en el subsuelo. Además del ejemplo clásico de la minería de interior, estas técnicas serán aplicables en la perforación de túneles para carreteras y ferrocarriles, en determinadas obras hidráulicas, en la creación de espacios subterráneos para almacenamiento, etc.

Las características que hacen especiales las obras subterráneas, desde la perspectiva de la topografía, son las siguientes:

- Iluminación: En las obras subterráneas es preciso trabajar con luz artificial, en ocasiones escasa. Eso obliga a emplear iluminación adicional, tanto en los equipos topográficos como en las señales de puntería y los puntos visados.
- Temperatura, humedad, etc.: Pueden suponer condiciones de trabajo incómodas para los operarios, pero también afectar a los equipos, que estarán sometidos a condiciones adversas que facilitan su deterioro.
- Existencia de polvo, gases nocivos o grisú: Suponen condiciones adversas y, en ocasiones, peligrosas.
- Espacios reducidos y por los que, con frecuencia, circulan vehículos o existe maquinaria en movimiento: Esto obliga, habitualmente, a fijar los puntos de estación en las paredes o en los techos de las labores y, en ocasiones, a estacionar en estos mismos puntos.
- Levantamiento de puntos de difícil acceso, en los que a menudo resulta imposible situar una señal de puntería.
- Comunicación entre las labores de interior y las de exterior: Pueden complicar, de manera importante, los trabajos topográficos de enlace entre dichas labores, en particular la transmisión de orientación al interior.
- La complejidad de las labores de interior, que puede dificultar el desarrollo de los trabajos topográficos y, especialmente, el replanteo de nuevas labores.
- Los levantamientos topográficos en minería deben seguir de cerca los avances de la explotación. Además, los vértices en los que se apoyan pueden verse afectados por los movimientos del terreno o, incluso, desaparecer.

Los planos de las labores mineras de interior deben llevarse al día, para poder organizar adecuadamente los trabajos de salvamento en caso de accidente, para relacionar las labores con posibles efectos en el exterior, para evitar intrusiones en los registros mineros colindantes, para evitar el problema de las aguas colgadas, etc.

Los trabajos topográficos intervienen en todas las fases del proceso minero. Sin ánimo de ser exhaustivos, podemos mencionar los siguientes casos:

- Prospección y exploración.
- Investigación por sondeos del yacimiento: replanteo de la malla de sondeos teórica, levantamiento topográfico de la situación real de los sondeos; sondeos inclinados.
- Replanteo de registros mineros.
- Levantamiento inicial de la zona minera. Replanteo de las obras e instalaciones a construir en el exterior.
- Toma de avances; replanteo de obras e instalaciones a construir en el interior.
- Replanteo de labores subterráneas; rompimiento entre labores.

9.2.- NOCIONES DE MINERÍA SUBTERRÁNEA

La explotación racional de una mina subterránea requiere el establecimiento de una red, cuidadosamente planificada, de pozos, galerías, rampas y chimeneas o coladeros. Estas labores permitirán el acceso al yacimiento, la circulación de personal o de maquinaria, la extracción de mineral y estéril, la ventilación de las labores, etc. (figura 9.1).

Pozos: Su función suele ser conectar las instalaciones de superficie con el subsuelo.

Se utilizan para la extracción de mineral y estéril, transporte de personal y maquinaria, ventilación, etc. Suelen ser verticales, aunque en algunos casos pueden seguir la inclinación del cuerpo mineral.

Su diámetro puede variar entre 1 ó 2 metros, para pozos de servicio, hasta 8 ó 10 metros en minas

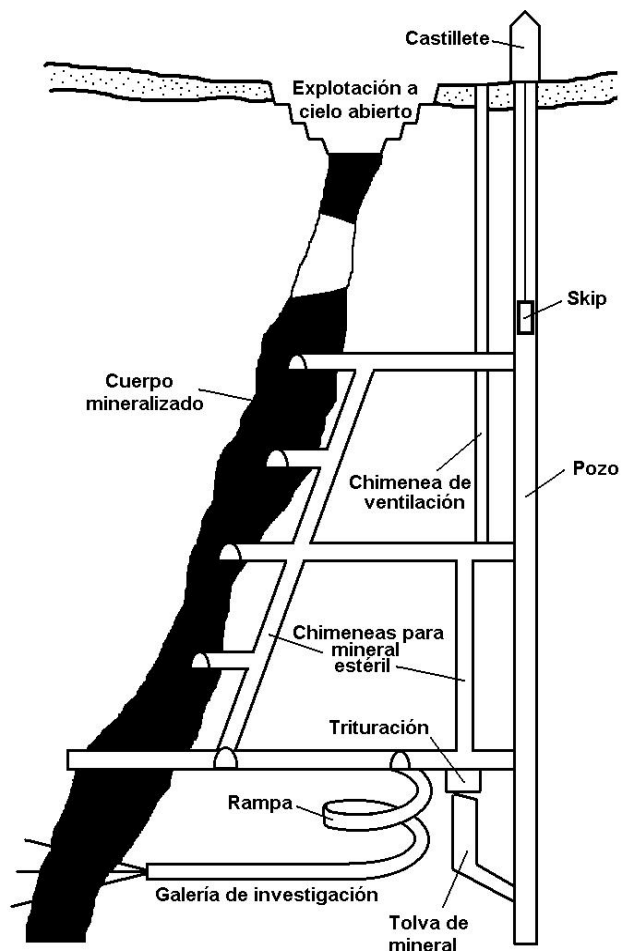


Fig. 9.1. Esquema de una mina de interior

importantes. Pueden tener secciones circulares o elípticas, que resisten mejor las presiones del terreno, o rectangulares, que presentan un mayor coeficiente de utilización. Pueden alcanzar varios centenares de metros de profundidad.

Suelen llevar entibación, sobre la que se apoyan las guías por las que se mueven las jaulas o skips.

Galerías: Se utilizan para preparación de túneles, exploración, acceso de personal y maquinaria a los tajos, transporte de mineral y estéril, etc. En ellas se instalan las vías, transportes, conducciones, cables eléctricos, etc.

Su forma puede ser trapezoidal o aproximadamente semicircular. Si las características del terreno lo exigen, se entiban. En el piso se excava un canal que permita la evacuación de aguas.

Chimeneas y coladeros: Sirven como conexiones, verticales o inclinadas, entre diferentes niveles de trabajo. Se perforan para permitir el transporte de mineral, de personal, para ventilación o para facilitar las labores de preparación.

Tienen sección cuadrada, rectangular o circular.

Rampas: Sirven para el acceso a las labores, sustituyendo o completando a los pozos, y para comunicar entre sí diferentes niveles. Su pendiente es inferior al 15% para permitir el movimiento de la maquinaria minera autopropulsada.

En estas labores se emplean distintos sistemas de perforación, en los que no vamos a extendernos. En todos los casos, la perforación será dirigida y controlada por los topógrafos, que calcularán la dirección e inclinación de los trabajos y realizarán el replanteo de estos.

9.3.- PLANOS REGLAMENTARIOS EN MINERÍA

El *Reglamento de Normas Básicas de Seguridad Minera*, y las *Instrucciones Técnicas Complementarias* correspondientes, indican que en todo trabajo o explotación subterráneos deben existir los siguientes planos:

- Plano topográfico de toda la superficie afectada por la explotación minera.- Escala mínima 1:5.000. Deben figurar en él las obras exteriores y edificaciones de la mina, los poblados, carreteras, líneas eléctricas, cauces de agua, etc. Deben situarse los pozos y polvorines, con indicación de su altitud. En este plano figurarán, asimismo, los límites del grupo minero.
- Plano general de labores.- Escala 1:2.000. Debe representar las labores ejecutadas y en ejecución, identificando claramente aquellas que se encuentren abandonadas.
- Plano de detalle de tajos y cuarteles.- Escala 1:1.000, normalmente. Se emplean proyecciones horizontales y verticales, secciones longitudinales y transversales (figura 9.2). Cuando existen varias plantas, se emplean colores diferentes para diferenciarlas. En minas metálicas debe elaborarse un plano

de metalizaciones, en proyección horizontal. Si existen varios cuerpos mineralizados se emplean proyecciones separadas para identificarlos claramente.

- Plano general de ventilación.- Escala 1:5.000. Debe figurar la dirección de la corriente de aire y su distribución, caudales en litros/segundo, etc.
- Plano general de la red eléctrica.
- Plano general de la red de aire comprimido.
- Plano general de la red de comunicaciones interiores.
- Plano general de la red de aguas, si procede.
- Plano general de transporte.
- Plano general de exteriores.

Todos ellos elaborados de acuerdo con la legislación vigente y acompañados de cualquier otro plano que la autoridad minera considere necesario. En las oficinas de la explotación minera debe disponerse de un ejemplar actualizado de cada uno de estos planos.

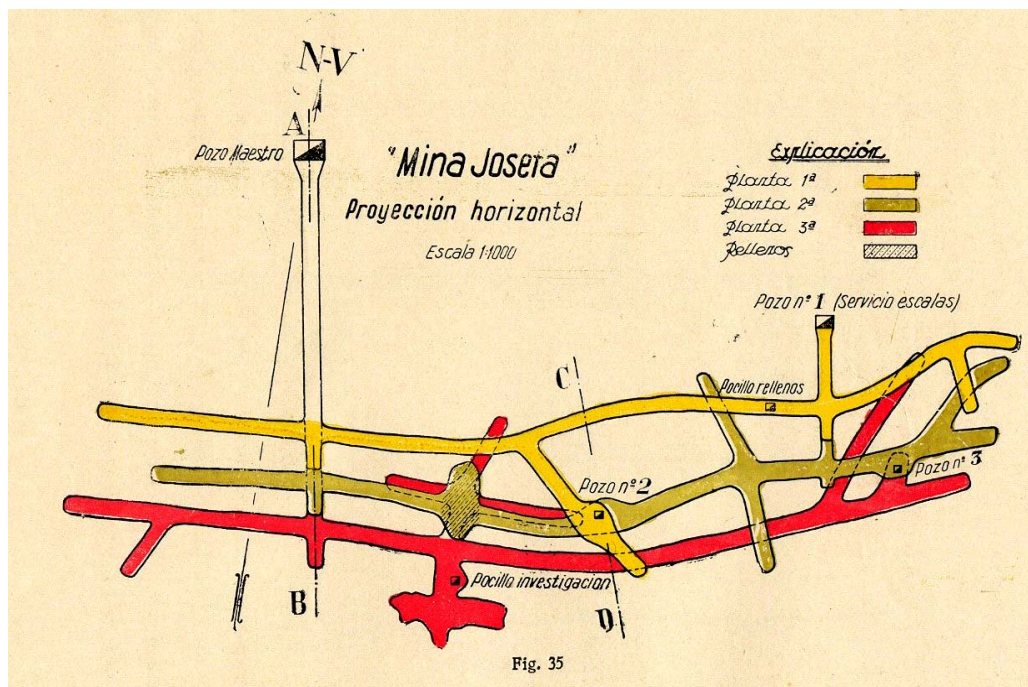


Fig. 9.2. Proyección horizontal (tomado de *Complementos topográficos de aplicación a la minería*, de Higinio Gil Cantero)

El Plan de Labores de la explotación debe presentarse en el mes de enero de cada año y recoge las labores que la empresa se propone desarrollar en el curso de ese año, en relación con el proyecto general de la explotación. La Memoria irá acompañada de los siguientes planos:

- Plano de situación de la explotación y de comunicaciones: Escala 1:50.000. Puede emplearse una fotocopia de parte de la hoja del Mapa Topográfico Nacional, marcando en él la situación de la explotación y los accesos a la misma.
- Plano de concesiones mineras: Escala 1:5.000.
- Plano de labores: Escala 1:1.000 ó 1:2.000.
- Plano de ventilación.

Todos ellos elaborados de acuerdo con la legislación vigente.

10. INSTRUMENTOS USADOS EN TOPOGRAFÍA SUBTERRÁNEA

10.1.- SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE ESTACIÓN

En topografía subterránea es muy habitual que las señales que marcan los puntos de estación no se puedan colocar en el suelo, ya que el paso de personal y de maquinaria podría hacerlas desaparecer. Por ello se colocan, normalmente, en el techo de las labores, utilizando una plomada para proyectarlas sobre el piso.

Para la puesta en estación proyectaremos el punto sobre el suelo, donde se marcará con un clavo, y se procederá a estacionar sobre el clavo utilizando el procedimiento habitual. En muchos casos se prefiere suspender una plomada desde el punto marcado en el techo y centrar el instrumento con referencia a esta plomada.

Los puntos de estación se elegirán de manera que los recorridos de los itinerarios sean lo más sencillos posible y su número de estaciones lo más bajo posible, para evitar la acumulación de errores. Las señales no deben estar sometidas a movimientos. Deben numerarse de forma ordenada y recoger claramente las observaciones necesarias en las libretas de campo, incluyendo croquis cuando sea preciso, para facilitar su localización.

En exterior, los puntos se suelen denominar usando letras mayúsculas. En interior se suelen emplear minúsculas, seguidas de apóstrofos o de subíndices en caso necesario.

Las estaciones marcadas en el techo de la labor deben ser fáciles de localizar y no estar expuestas a desaparecer. Para que el punto de estación quede marcado inequívocamente, emplearemos las siguientes normas:

- El hueco del cáncamo por el que pasa el hilo de la plomada debe ser de diámetro un poco superior al de éste.
- El cáncamo debe situarse en el plano vertical que contenga a la bisectriz del ángulo formado por las dos visuales a lanzar desde la estación: la de la estación anterior y la de la siguiente.
- El hilo de la plomada debe introducirse en el ojal siempre en el mismo sentido y utilizando esta norma para todas las estaciones.

Cuando la entibación es de madera (figura 10.1) las señales se clavan con facilidad. Pueden emplearse grapas de hierro, cerrando un poco la curvatura para aproximarla al grosor del hilo de la plomada. También puede emplearse un cáncamo normal, con el ojal pequeño.

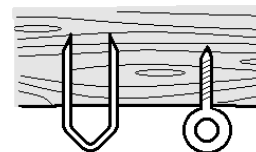


Fig. 10.1. Señalización de estaciones (1)

Cuando la entibación es de metal puede sujetarse una cuña de madera, mediante grapas, y proceder como en el caso anterior. También se utiliza una pistola (de las que emplean los electricistas) para empotrar tornillos apropiados, provistos de un ojal, en la entibación.

En labores en roca puede utilizarse un martillo perforador para hacer un taladro e introducir en él un taco de madera sobre el que se clavará el cáncamo (figura 10.2). También pueden emplearse tacos de plástico. Utilizando cemento mezclado con sosa, para que fragüe rápido, se pueden sujetar grapas en el techo (figura 10.3). En este caso conviene doblar ligeramente las patas de la grapa hacia afuera y cerrar la curvatura de ésta, como se indicó antes.

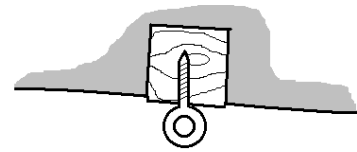


Fig. 10.2. Señalización de estaciones (2)

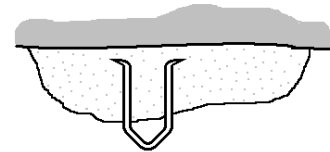


Fig. 10.3. Señalización de estaciones (3)

Para localizar fácilmente los puntos, conviene marcar un círculo rojo con pintura alrededor de cada uno, una vez puesta la señal que sujetará la plomada.

10.2.- MEDIDA DE ÁNGULOS

Las circunstancias propias de los trabajos de interior obligan, con frecuencia, a establecer itinerarios de lados muy cortos, lo que supone mayores errores en la medida de ángulos. En particular, el error de dirección puede ser muy importante, especialmente si la puesta en estación no se hace con el cuidado necesario.

Antiguamente se empleaban teodolitos con anteojo excéntrico, de manera que se pudieran lanzar visuales verticales a lo largo de pozos y chimeneas. Pero las complicaciones que suponían, y la necesidad de introducir en todas las mediciones la corrección por excentricidad, han hecho que en la actualidad se utilicen, normalmente, equipos de uso general. Para poder lanzar visuales verticales, estos equipos se dotan de oculares acodados.

También pueden emplearse, siempre que la apreciación sea compatible con la precisión de los trabajos topográficos y que no existan perturbaciones magnéticas en el subsuelo, las brújulas.

Para transmitir la orientación a las labores de interior puede emplearse el giroteodolito, que estudiaremos más adelante, al tratar el tema de la orientación en labores subterráneas.

10.2.1.- Teodolitos, taquímetros y estaciones totales

Como hemos indicado, suelen emplearse instrumentos similares a los de exterior, siempre teniendo en cuenta las condiciones de iluminación de las labores subterráneas y, en caso necesario, que sean antigrisú.

No obstante, existen equipos especialmente diseñados para trabajos de interior. Estos equipos se estacionan de manera que no interrumpen los servicios de arranque y de transporte de material.

En algunos casos se coloca el instrumento sobre una barra horizontal, que se apoya en los hastiales a altura suficiente para no interrumpir el transporte. En otros casos, especialmente si las labores son angostas, el instrumento se suspende de un perno introducido en el hastial o en el techo de la labor.

Los equipos antiguos se iluminaban, mediante el equipo adecuado, a través de los puntos de entrada de luz, de manera que pudieran tomarse lecturas sobre los limbos. Los teodolitos electrónicos y las estaciones totales disponen de una pantalla, donde pueden leerse los resultados de la medición, que puede estar iluminada.

Las plomadas y las señales de puntería se iluminan desde atrás, interponiendo una pantalla de papel o de plástico para no deslumbrar al operario del instrumento. También pueden iluminarse lateralmente. Todos los equipos de iluminación, en el caso de minas de carbón, deben ser antigrisú.

La puesta en estación se realiza, generalmente, con relación a una plomada que cuelga de un cáncamo situado en el techo de la labor, como hemos visto (figura 10.4). Moveremos el instrumento, montado sobre el trípode, hasta situarlo aproximadamente bajo la plomada y, a continuación, utilizaremos el juego del instrumento sobre la meseta del trípode para afinar mejor. La plomada debe estar en la prolongación del eje principal del instrumento.

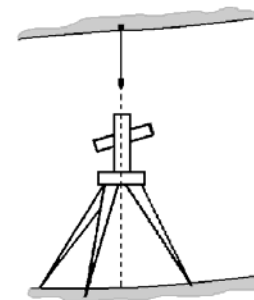


Fig. 10.4. Puesta en estación

Muchos instrumentos llevan una señal o un pivote para indicar el centro del anteojo. Si situamos el anteojo en posición horizontal, esta señal nos indicará el punto sobre el que debe estar la plomada para conseguir la puesta en estación. Si el aparato no dispone de esta señal, la materializamos estacionando aproximadamente bajo la plomada y marcando con un lápiz el círculo que describe la punta de ésta sobre el anteojo (situado en posición horizontal) al girar la alidada horizontal. El centro de este círculo es el punto buscado.

Para medir el ángulo entre ejes de un itinerario (figura 10.5) se sitúan plomadas en los tres puntos que lo definen, es decir en los puntos que marcan nuestra estación y las estaciones anterior y siguiente. Como en el caso de medición de ángulos en el exterior, si hemos orientado previamente el instrumento (con la visual de espaldas) obtendremos acimutes y si no, obtendremos las lecturas horizontales.

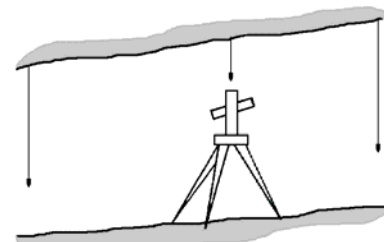


Fig. 10.5. Medición de ángulos

Si interesa calcular el ángulo interior, se puede hacer por diferencia de lecturas o, directamente, haciendo cero en la visual de espaldas.

Cuando no sea posible estacionar en el punto E previsto (por existir escombros, agua, inicio de una labor, etc.) lo haremos en un punto P lo más próximo posible y desde el que sean visibles las estaciones anterior A y siguiente B (figura 10.6). Aplicaremos la *reducción al centro de estación* para calcular los ángulos a y b y las distancias D_{EA} y D_{EB} que se habrían medido de haber podido estacionar en E .

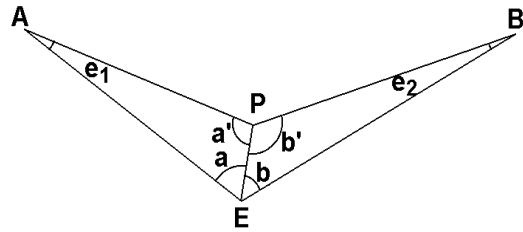


Fig. 10.6. Reducción al centro de estación

Tras estacionar en P visamos a los puntos A y B , determinando los ángulos a' y b' y midiendo las distancias D_{PA} y D_{PB} . También mediremos la distancia D_{EP} . En todos los casos nos referimos, naturalmente, a distancias reducidas.

Resolviendo los dos triángulos formados, de cada uno de los cuales conocemos dos lados y el ángulo comprendido, podremos calcular los ángulos a y b y las distancias D_{EA} y D_{EB} que nos interesan.

10.2.2.- Brújulas

Las brújulas montadas sobre trípode se utilizan como en topografía de exterior, estacionando en los puntos señalados por plomadas y midiendo los rumbos correspondientes a los ejes de los itinerarios o a los puntos levantados por radiación.

Como sabemos, la ventaja fundamental de la brújula es que se orienta al norte magnético, una vez liberada la aguja. Como inconvenientes podemos mencionar:

- Menor precisión.
- La declinación magnética varía continuamente.
- Pueden existir anomalías en el campo magnético provocadas por minerales metálicos, maquinaria, vías, líneas eléctricas, etc.

En labores angostas se emplea la brújula colgada o brújula de minero (figura 10.7). Esta brújula se cuelga de un punto intermedio de una cuerda tendida entre los dos puntos que definen la alineación a medir. Va montada sobre una suspensión cardán, de manera que puede nivelarse a pesar de la inclinación de la cuerda de la que cuelga.

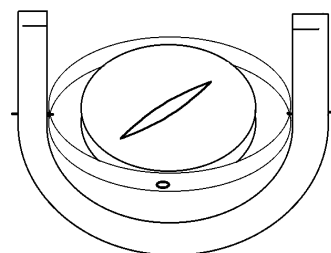


Fig. 10.7. Brújula colgada

Para evitar que la brújula deslice sobre la cuerda, si ésta está muy inclinada, se utilizan pinzas o se hacen nudos.

Las brújulas colgadas suelen ir divididas en medios grados. Para mejorar la precisión se toma la media aritmética de las lecturas tomadas con las dos puntas de la

aguja, previa corrección de la de espaldas. Suelen ser de limbo móvil y graduación inversa.

La brújula colgada sólo debe emplearse cuando no sea posible utilizar un instrumento más preciso. No mide ángulos verticales por lo que debe usarse acompañada de un eclímetro.

10.2.3.- Eclímetros

Sirven para medir, en labores angostas, el ángulo vertical correspondiente a la alineación formada por dos puntos. Así podrá determinarse la distancia reducida y el desnivel entre ellos.

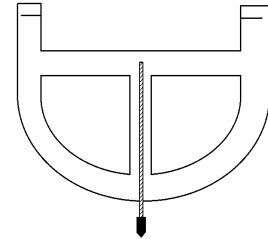


Fig. 10.8. Eclímetro

Están constituidos por un semicírculo graduado y una plomada que cuelga del centro del círculo. El hilo de esta plomada sirve como índice de lectura.

Se utilizan colgados de una cuerda tendida entre los puntos, como las brújulas mineras. En el caso de los eclímetros, si la cuerda es bastante horizontal conviene colgarlo del centro de ésta. En caso contrario es conveniente suspenderla alternativamente de ambos extremos del hilo, a un metro de cada uno de ellos, y hallar la media aritmética de las dos lecturas obtenidas.

Debe anotarse claramente si la inclinación es subiendo o bajando, para no cometer errores en el cálculo del desnivel.

10.3.- MEDIDA DE DISTANCIAS

Como ocurre en topografía de exterior, las distancias que van a interesar en topografía minera son las distancias reducidas. Por otra parte, también será necesario, en muchas ocasiones, determinar la profundidad de los pozos y otras labores.

10.3.1.- Medida directa de distancias horizontales

La medida directa puede ser conveniente en algunos casos, especialmente cuando nos encontramos con distancias cortas y labores angostas en las que no resulta fácil estacionar un instrumento topográfico. El instrumento que vamos a utilizar es el rodete.

Para distancias inferiores a 20 ó 25m y sensiblemente horizontales la medición pueden realizarla dos operarios que tensan la cinta sujetándola a la altura del pecho. Las plomadas que nos señalan los puntos servirán de índices de lectura sobre la cinta. Si necesitamos efectuar la medición con más precisión, y para evitar el error producido por la catenaria que forma la cinta, será necesario apoyarla sobre el suelo, clavando en cada extremo (siguiendo las direcciones de las plomadas) unas agujas especiales.

Cuando la alineación a medir es inclinada, será necesario medir la inclinación (con goniómetro o eclímetro) para luego poder determinar la distancia reducida. Para proceder con la debida precisión, la inclinación medida debe corresponder, sensiblemente, al eje (o al piso) de la labor. Así, si medimos con una estación total la inclinación de la alineación marcada por dos plomadas, debemos procurar que la altura del instrumento coincida con la del jalón sobre el que va el prisma de reflexión total.

Según hayamos medido una distancia cenital o una altura de horizonte, la distancia reducida se obtiene, como sabemos, multiplicando la distancia natural medida por el seno o por el coseno del ángulo, respectivamente.

Otra posibilidad es la de medir por resaltos horizontales, dividiendo la longitud total en tantos tramos horizontales como sea preciso y midiéndolos por separado. Entre cada dos tramos se sitúa una plomada, que indica el final de un tramo y el principio del siguiente. Las plomadas deben alinearse correctamente, preferiblemente con ayuda del antejo de un goniómetro.

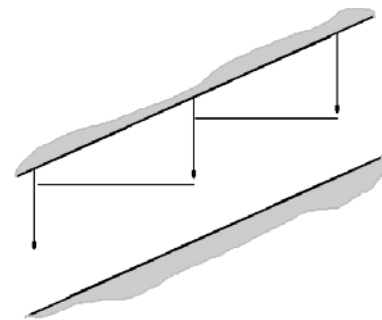


Fig. 10.9. Medida de la distancia por resaltos horizontales

En general, para realizar las mediciones con precisión, debemos tener en cuenta:

- La cinta métrica debe ser contrastada.
- Si es posible, mediremos sobre el suelo de la labor para tener en cuenta el error de catenaria.
- Cuando la longitud total a medir sea mayor que la de la cinta, debemos dividir aquella en tramos. Las señales (agujas, plomadas, etc.) que marquen cada tramo deben estar bien alineadas.
- Si la longitud a medir es inclinada, debemos medir también la inclinación para poder calcular la distancia reducida. Si la alineación está compuesta por tramos de distinta inclinación, mediremos por separado la distancia y la inclinación de cada tramo.

10.3.2.- Medida directa de distancias verticales

Existen varios posibles métodos. En cada ocasión tendremos en cuenta la precisión necesaria antes de elegir entre uno y otro.

Medida con hilo de acero

Se baja por la labor a medir un hilo de acero lastrado, que va enrollado en un torno provisto de freno (figura 10.10). Haremos sobre el hilo las señales necesarias para medir la profundidad de los distintos puntos de interés. A continuación se saca el hilo y se extiende en un terreno horizontal. Mediremos la distancia L entre las señales utilizando una cinta métrica debidamente contrastada.

Si la precisión del trabajo lo requiere, corregimos la distancia medida, teniendo en cuenta el alargamiento elástico del hilo de acero, con la expresión:

$$\Delta L = \frac{\gamma L^2}{2E} + \frac{PL}{\Omega E}$$

Siendo:

- L la longitud medida con cinta expresada en cm
- γ el peso específico del acero: $0,0079 \text{ kg/cm}^3$
- E el módulo de elasticidad del acero: $2.100.000 \text{ kg/cm}^2$
- P el peso del lastre en Kg
- Ω la sección transversal del hilo en cm^2

El resultado viene expresado en cm y hay que añadirlo a la longitud medida.

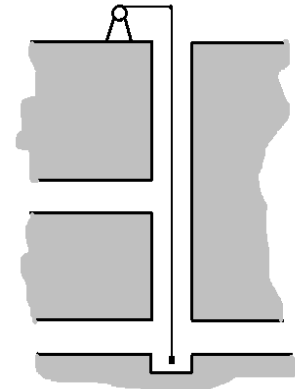


Fig. 10.10. Medida en pozos

Medida con cinta metálica

Se utilizan cintas de $50m$ de longitud. Si se precisa medir profundidades mayores podemos unir dos cintas, obteniendo una de $100m$.

Las cintas se lastran con un peso de $5kg$ y se van bajando de una labor a otra, haciendo sobre ella las señales correspondientes. Normalmente se desprecia el alargamiento de la cinta, pero es conveniente que ésta esté bien contrastada.

Método Firminy

Es un método muy preciso, pero más complicado de realizar. Emplea un hilo de acero, normalizado y enrollado en un torno con freno. La medición se realiza gracias a una bancada, situada en el exterior, provista de una regla móvil de 4 ó $5m$ de largo. Para medir la longitud del hilo entre dos señales, correspondientes a los dos puntos entre los que se quiere medir la profundidad, se va haciendo por tramos de la misma longitud que la regla.

10.3.3.- Medida indirecta de distancias

Para medir distancias horizontales en interior se utilizan instrumentos similares a los empleados en topografía exterior. No nos extendemos en los métodos estadimétricos, suficientemente conocidos y que en la actualidad han sido sustituidos por los métodos electrónicos.

Los equipos electrónicos de medida de distancias pueden ser empleados en el interior, pero conviene comprobar antes que no se producen errores provocados por la reflexión en las paredes y el techo de las labores. Son muy convenientes las estaciones totales láser, ya que las distancias cortas pueden medirse sin empleo de prisma y el mismo haz láser nos indica el punto que estamos visando, lo que facilita el levantamiento de puntos de difícil acceso.

El empleo de estaciones totales permite, como sabemos, medir simultáneamente ángulos, distancias y desniveles, lo que simplifica enormemente el trabajo.

En el caso de minas grisuosas, es preciso comprobar previamente que los equipos electrónicos cumplen las normas de seguridad.

Para la medición de distancias verticales en pozos, también pueden emplearse determinados equipos electrónicos. Estos equipos deben ser susceptibles de lanzar visuales cenitales y admitir oculares acodados. Para medir la profundidad del pozo, el equipo debe situarse al fondo del mismo. Si fuese preciso estacionarlo sobre una plataforma, se deben montar dos: una para el equipo y otra para el operador. De lo contrario, los movimientos de éste podrían transmitirse a aquel.

11. MÉTODOS TOPOGRÁFICOS SUBTERRÁNEOS

11.1.- INTRODUCCIÓN

Mucho antes de que comiencen las labores de excavación será necesario realizar un levantamiento topográfico de superficie de la zona que va a verse afectada por la explotación minera o por la obra subterránea en cuestión. Como hemos visto, la escala mínima de este levantamiento será de 1:5.000 ya que va a servir, entre otras cosas, para elaborar el plano de superficie correspondiente.

El levantamiento de superficie es un trabajo topográfico convencional, para el que habrá que establecer las redes planimétricas y altimétricas habituales y aplicar los métodos e instrumentos propios de la topografía de exterior. También puede resolverse esta fase mediante un levantamiento fotogramétrico, sobre el que habrá que incorporar otros datos, como la situación de los polvorines.

Estos planos de superficie deben mantenerse permanentemente actualizados, pero en minería subterránea (al contrario de los que ocurre en minería a cielo abierto) las variaciones en superficie son relativamente pequeñas y se suelen limitar a la construcción de algunas instalaciones y edificios en el exterior y, eventualmente, al avance de vertederos de estériles. Mención aparte merece el caso de hundimientos en superficie provocados por las labores de interior, que estudiaremos más adelante.

El levantamiento y la actualización de planos, a partir de los vértices empleados para el levantamiento topográfico o fotogramétrico inicial, resulta sencillo y no vamos a extendernos en él.

Un caso especial es el constituido por los trabajos topográficos que permiten enlazar las labores de interior con el levantamiento exterior, necesarios para referir aquellas al mismo sistema de coordenadas empleadas en éste (y, en definitiva, enlazar con la red geodésica) y de los que nos ocuparemos más adelante.

En este capítulo vamos a tratar los métodos planimétricos y altimétricos empleados para el levantamiento de las labores subterráneas y para la actualización continua de estos trabajos, especialmente en lo que se refiere a la toma de avances de los frentes de explotación.

11.2.- MÉTODOS PLANIMÉTRICOS

La distribución de las labores subterráneas hace inviable, en la mayoría de los casos, la aplicación del método de intersección para el levantamiento planimétrico de vértices en interior.

En ocasiones se emplea la intersección directa para el levantamiento de puntos de difícil acceso y en los cuales resultaría difícil, e incluso peligroso, situar una señal de puntería. El procedimiento operativo consiste en estacionar en dos puntos conocidos, tan alejados entre sí como sea posible, y visar desde cada uno de ellos al otro punto conocido y al punto que se desea medir (figura 11.1). Como sabemos, las coordenadas planas de este último punto pueden calcularse a partir de las de los puntos conocidos y de las lecturas horizontales obtenidas. Esta operación puede realizarse también, como hemos visto, con distanciómetros o estaciones totales láser, siempre que la distancia al punto de estación no supere el alcance del equipo.

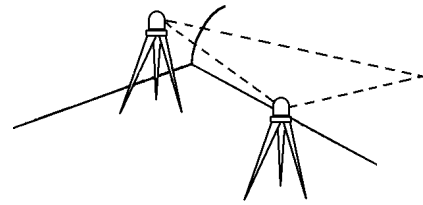


Fig. 11.1. Intersección

Tampoco es frecuente emplear la fotogrametría terrestre en interior, entre otras razones por los problemas de iluminación inherentes a los trabajos subterráneos. No obstante, en ocasiones se realizan levantamientos fotogramétricos situando un equipo giratorio que proyecta un haz de rayos láser, según un plano vertical, marcando el perfil de la labor. Este perfil puede ser fotografiado y restituido.

El método más usado es el de itinerario, a través de las galerías y otras labores, completado con el de radiación para el levantamiento de detalles.

11.2.1.- Método itinerario

Los itinerarios de interior se realizan y se calculan del mismo modo que los de exterior. Pero en este caso las dificultades son mayores, como se ha indicado, debido al elevado número de ejes, a su reducida longitud y a las dificultades de la puesta en estación y de la realización de las mediciones. Es fundamental poner especial atención en la planificación y en la ejecución de estos trabajos para evitar una acumulación excesiva de errores.

Según los casos, emplearemos unos u otros de los instrumentos topográficos que hemos visto. Los teodolitos y estaciones totales nos proporcionan los mejores resultados, pero en ocasiones habrá que emplear brújulas y eclímetros para la medida de ángulos y cinta métrica para la de distancias.

Itinerario cerrado

Los itinerarios cerrados son aquellos en los que el punto final coincide con el inicial. Los aplicaremos siempre que sea posible, estableciendo un recorrido por las labores que interesa levantar hasta volver, por éstas o por otras ya levantadas, al punto inicial.

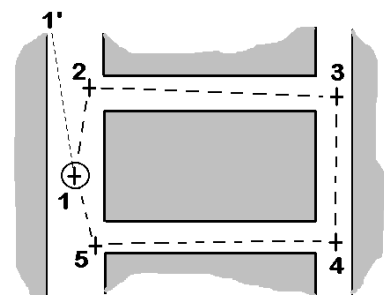


Fig. 11.2. Itinerario cerrado

Para relacionar las coordenadas de los puntos visados con las de los vértices del levantamiento exterior, necesitaremos conocer las coordenadas de la primera estación del itinerario y disponer de una dirección de acimut conocido (1-1' en la figura 11.2), que nos permita orientar el itinerario. Esta orientación puede haberse transmitido a través de un pozo o de una rampa u obtenido por otros métodos.

El error de cierre acimutal puede calcularse, antes de resolver numéricamente el itinerario, a partir de la diferencia de los sumatorios de lecturas de espaldas y lecturas de frente. Una vez calculados los acimutes de los ejes, el error de cierre e_a se divide por el número de estaciones n y se compensa de la siguiente forma:

$$f = e_a/n$$

$$(\theta_1^2)_c = \theta_1^2 - f$$

$$(\theta_2^3)_c = \theta_2^3 - 2f$$

$$\dots$$

$$(\theta_{N-1}^N)_c = \theta_{N-1}^N - nf$$

que tiene en cuenta que, si utilizamos un goniómetro que no sea una brújula, los errores acimutales se van transmitiendo y acumulando a lo largo del itinerario. En itinerario cerrados la última estación N coincidirá con la primera. En el caso de que se emplee una brújula los errores angulares no se transmiten, ya que la brújula se orienta en cada estación de forma independiente de las demás estaciones. En este caso, para compensar los rumbos medidos se aplicará el mismo valor a todos ellos.

Los errores de cierre en cada una de las coordenadas (X, Y y Z) se compensan repartiéndolos de forma proporcional al valor absoluto de cada uno de los valores calculados para las coordenadas.

Otras veces (figura 11.3) se realizan itinerarios cerrados recorriendo una labor en un sentido y volviendo en sentido contrario por la misma labor hasta regresar al punto de estación. El inconveniente de estos itinerarios es que, para realizarlos de forma adecuada, conviene que las estaciones del recorrido de ida sean diferentes de las del recorrido de vuelta, lo que no siempre es factible en labores angostas. También en este caso necesitamos una visual de acimut conocido (1-1') desde la primera estación para poder orientar el itinerario.

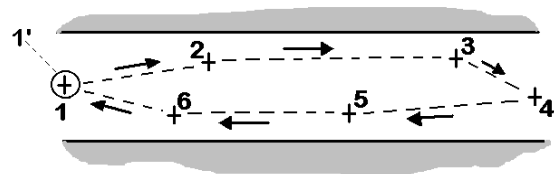


Fig. 11.3. Itinerario cerrado por una galería

Itinerario encuadrado

En ocasiones se dispone de dos puntos de coordenadas conocidas, entre los que se puede establecer un itinerario encuadrado. En los itinerarios encuadrados de exterior, la orientación se consigue, normalmente, lanzando visuales entre las dos estaciones extremas (D y H en la figura 11.4), lo que no suele ser posible en interior ya que es raro que estos dos puntos sean visibles entre sí. Los puntos de interior de coordenadas conocidas pueden corresponder a dos pozos, cuyas coordenadas se han calculado mediante un itinerario

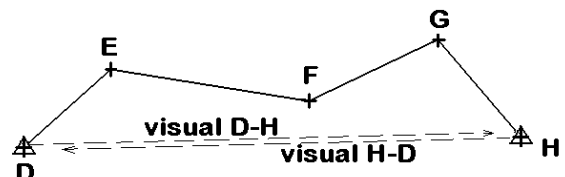


Fig. 11.4. Itinerario encuadrado (exterior)

de exterior ligado a la red geodésica. Mediante plomadas situadas en los pozos marcamos las estaciones en el interior y sus coordenadas planas (X e Y) coincidirán con las de exterior y serán, por tanto, conocidas. Las coordenadas del punto de interior también pueden haberse medido a través de una rampa.

Además, puede ser que hayamos transmitido la orientación al interior, por ejemplo, a través de un pozo o por una rampa (direcciones $d-d'$ y $h-h'$ en la figura 11.5). La transmisión de orientación al interior se estudiará posteriormente, pero podemos adelantar que nos proporciona una dirección de acimut conocido a partir del punto materializado en el interior, lo que permite orientar el instrumento topográfico estacionado en él (o calcular la corrección de orientación, si se prefiere trabajar así).

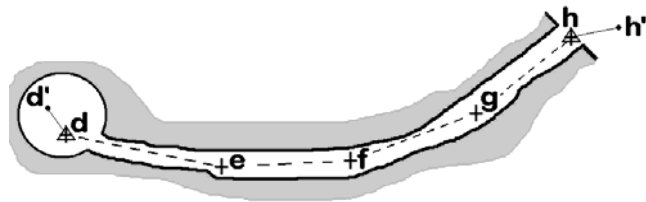


Fig. 11.5. Itinerario encuadrado (interior) con estaciones extremas (d y h) orientadas

En otras ocasiones no se dispone más que de las coordenadas de una sola estación, que puede estar orientada o no estarlo.

En función de los datos disponibles sobre las estaciones inicial (E_I) y final (E_F) se pueden dar los siguientes casos:

- E_I y E_F conocidos y visibles entre sí.- El itinerario se resuelve y se compensa por el procedimiento que ya conocemos: la primera visual de espaldas (de E_I a E_F) sirve para orientar el itinerario y la última visual de frente (de E_F a E_I) sirve para calcular el error de cierre acimutal.

- E_I y E_F conocidos y no visibles entre sí. Ambos están orientados.- El itinerario se resuelve de forma similar, pero en esta ocasión la orientación se consigue lanzando desde E_I la visual de acimut conocido (V_1) y el error de cierre acimutal se calcula lanzando desde E_F la otra visual (V_2) de acimut conocido (figura 11.6).

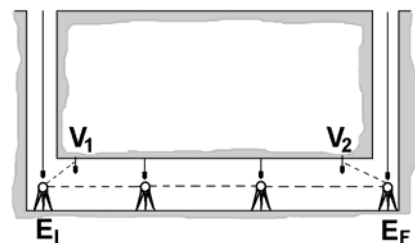


Fig. 11.6. Itinerario encuadrado con estaciones extremas orientadas

- E_I y E_F conocidos y no visibles entre sí. Sólo E_I está orientado.- Se orienta el itinerario mediante la visual de E_I . Se resuelve y se calculan las coordenadas de E_F . Comparando estas coordenadas con las que conocemos de antemano, se ve si el error de cierre es excesivo. Para compensarlo, calculamos el acimut θ_{IF}^F y la distancia reducida D_{IF} de la alineación de los dos puntos con las coordenadas conocidas de ambos. A continuación volvemos a calcularlos pero empleando para E_F las coordenadas obtenidas tras resolver el itinerario. La diferencia entre estos dos acimutes se aplica a los acimutes de todos los tramos del itinerario. Las distancias de los tramos se corrigen multiplicándolas por la relación entre las dos distancias

calculadas. Finalmente, se vuelven a calcular, con estos nuevos datos, las coordenadas de todas las estaciones.

- E_I y E_F conocidos y no visibles entre sí. Ninguno de los dos está orientado.- Partimos de una orientación arbitraria desde E_I y resolvemos el itinerario hasta calcular las coordenadas de E_F . Procedemos como en el caso anterior, corrigiendo los acimutes y las distancias de los tramos del itinerario. La diferencia es que, en este caso, el itinerario no tiene comprobación.
- Sólo E_I es conocido y está orientado.- El itinerario no tiene comprobación.

Como vemos, si sólo se han determinado las coordenadas en los pozos, relacionándolas con la red exterior, pero no se ha transmitido la orientación al interior, el itinerario tiene solución pero no se puede comprobar ni compensar, salvo que las estaciones extremas sean visibles entre sí. En los itinerarios abiertos denominados *colgados*, podemos calcular las coordenadas de las estaciones pero no el error de cierre. Esto supone que cualquier error importante puede pasar desapercibido, lo que resulta arriesgado. La única solución consiste en repetir el itinerario en sentido contrario, procurando, como hemos indicado, estacionar en puntos distintos a los anteriores.

11.2.2.- Método de radiación

Emplearemos el método de radiación para completar el levantamiento de las distintas labores de interior. Se levantarán todos los detalles que deban figurar en los planos de la explotación y también aquellos que puedan ser relevantes para las labores de investigación (fallas, contactos, etc.) y de planificación minera (secciones, perfiles, etc.).

El método de radiación se aplica desde las estaciones de los itinerarios. Como sabemos, se puede trabajar con el instrumento topográfico orientado, midiendo directamente los acimutes de las alineaciones visadas. Si optamos por no orientar el instrumento, será preciso lanzar una visual a una dirección de acimut conocido (normalmente la estación anterior del itinerario) para poder trabajar mediante corrección de orientación. Lo más adecuado es realizar conjuntamente los itinerarios y la radiación, siempre que sea posible. De esta manera ahorramos tiempo y reducimos la posibilidad de que se produzcan errores groseros, ya que sólo hay que estacionar una vez en cada punto de estación.

Tal como ocurre con los itinerarios, todos los puntos radiados deben referirse a la red exterior para trabajar en un sistema de coordenadas común a ambas redes.

En caso necesario, puede levantarse por radiación una estación destacada e_d desde la que se levantan posteriormente, también por radiación, los puntos de interés 1, 2, 3, etc.

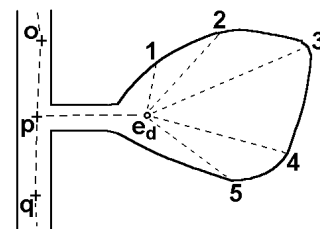


Fig. 11.7. Estación destacada

(figura 11.7). Para poder orientar esta estación destacada se lanza, una vez hemos estacionado en ella, una visual de espaldas a la estación p del itinerario desde la que la habíamos levantado.

11.2.3.- Método de abscisas y ordenadas

Este método puede aplicarse cuando las distancias se miden con cinta métrica. Se emplea para levantar puntos de detalle a partir de una alineación central $i-f$ materializada por la cinta (figura 11.8).

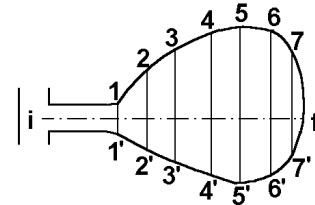


Fig. 11.8. Método de abscisas y ordenadas

Con una segunda cinta levantamos las ordenadas de los puntos, llevándola perpendicularmente a la primera cinta, que actúa como eje de abscisas.

11.3.- MÉTODOS ALTIMÉTRICOS

Al igual que sucede en los trabajos de exterior, los requerimientos de precisión en levantamientos altimétricos de interior son muy variables y dependen de la finalidad de cada uno de ellos. Así, en la toma de avances puede que no se necesite gran precisión altimétrica pero cuando nos referimos a una galería que debe tener una pendiente regular, y puede estar sometida a movimientos del terreno, estos requerimientos pueden ser muy estrictos.

Lo mismo ocurre en explotaciones muy mecanizadas. El emplazamiento correcto de la maquinaria de perforación y extracción exige un trabajo altimétrico preciso, máxime cuando se pretenda comunicar entre sí labores preexistentes mediante chimeneas, rampas o galerías.

Los trabajos altimétricos de interior deben estar relacionados con los de exterior. Para determinar la altitud de los puntos de interior, a partir de los de exterior, utilizaremos alguno/s de los siguientes métodos:

- Medir, con hilo de acero o cinta metálica, la profundidad del pozo desde la embocadura hasta cada uno de los niveles de la explotación.
- Medir con distanciómetro, o estación total, la profundidad del pozo mediante una visual vertical.
- Realizar un itinerario altimétrico a través de una rampa de acceso al interior.

Una vez calculada la altitud de algún punto del interior, se arrastra a todos los puntos que se levanten, sean estaciones de itinerarios o puntos radiados. Como en planimetría, conviene que los itinerarios altimétricos sean cerrados o encuadrados, para poder calcular y compensar los errores de cierre.

En muchas ocasiones, las señales que marcan las estaciones de los itinerarios estarán situadas en el techo de la labor, por lo que puede ser conveniente realizar la nivelación por éste y referirla a dichas señales. En otras ocasiones, la

nivelación se hace por el piso y va referida a señales situadas en éste o a la proyección sobre él de las señales situadas en el techo. En cada ocasión debe quedar perfectamente especificado a cuál de los dos casos se refiere la coordenada Z de cada punto.

Por lo demás, se utilizan en interior los mismos métodos que en exterior: nivelación trigonométrica y nivelación geométrica. Cuando la inclinación de la labor se haya medido con un eclímetro colgado, mediremos también la longitud real l de la misma y calcularemos el desnivel entre sus puntos extremos con la expresión:

$$\Delta Z = l \operatorname{sen} \alpha$$

siendo α la inclinación respecto a la horizontal (altura de horizonte). Para arrastrar la altitud de un punto a otro hay que tener en cuenta si la inclinación de la labor es en sentido ascendente (desnivel positivo) o descendente (desnivel negativo).

11.3.1.- Nivelación trigonométrica

Se emplea cuando los requerimientos de precisión no son muy estrictos. La nivelación trigonométrica tiene la ventaja de que puede efectuarse en paralelo a los itinerarios planimétricos, aprovechando las mismas puestas en estación, pero es menos precisa que la nivelación geométrica. También la emplearemos para calcular la Z de los puntos radiados. En función de que las referencias se sitúen en el techo o en el suelo, podemos encontrarnos con los siguientes casos:

El punto de estación y el punto visado se materializan en el piso de la labor

Como sabemos, si se lanza una visual a una mira o un prisma de reflexión total, el desnivel entre el punto visado V y el de estación E viene dado por (figura 11.9):

$$Z_E^V = t + i - m = D_R / \operatorname{tg} \varphi + i - m$$

siendo:

- t : tangente topográfica. Será positiva en las visuales ascendentes y negativa en las descendentes. Se aplica con su signo.
- D_R : distancia reducida entre los dos puntos.
- φ : distancia cenital de la visual lanzada.
- i : altura del instrumento.
- $m = Ap$: lectura de mira o altura del prisma respecto al suelo.

La altitud del punto visado será:

$$Z_V = Z_E + Z_E^V$$

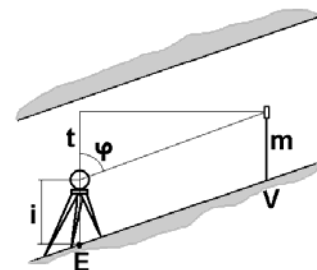


Fig. 11.9. Nivelación trigonométrica (1)

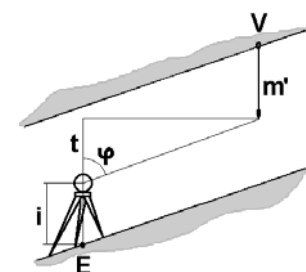


Fig. 11.10. Nivelación trigonométrica (2)

El punto de estación se sitúa en el piso y el punto visado en el techo de la labor

Si visamos a la punta de la plomada, que cuelga del punto V materializado en el techo de la labor, será (figura 11.10):

$$Z_E^V = t + i + m' = D_R / \text{tg } \varphi + i + m'$$

- m' : longitud del hilo de la plomada.

Naturalmente, si visamos directamente al punto situada en el techo, haremos $m'=0$.

El punto de estación se sitúa en el techo y el punto visado en el piso de la labor

El instrumento se estaciona con relación a la plomada que cuelga del punto E , marcado en el techo de la labor. Si visamos a la mira o al prisma situado en el punto V del piso, tendremos (figura 11.11):

$$Z_E^V = t - i' - m = D_R / \text{tg } \varphi - i' - m$$

- i' : coaltura del instrumento. Es la altura desde el centro del anteojo del instrumento hasta el punto de estación situado en el techo.
- $m=Ap$: lectura de mira o altura del prisma respecto al suelo.

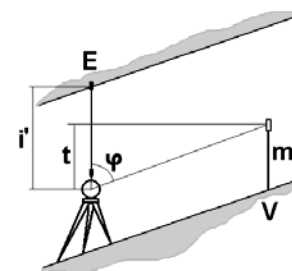


Fig. 11.11. Nivelación trigonométrica (3)

Como en los casos anteriores, t se aplica con su signo. En este caso, el desnivel está medido con relación al techo de la labor.

Ambos puntos se materializan en el techo de la labor

Suponiendo que visamos a la punta de la plomada que cuelga de V , será (figura 11.12):

$$Z_E^V = t - i' + m' = D_R / \text{tg } \varphi - i' + m'$$

- m' : longitud del hilo de la plomada.
- i' : coaltura del instrumento.

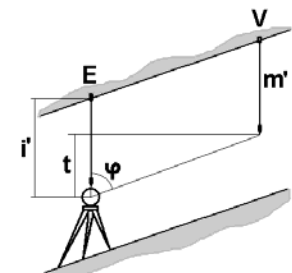


Fig. 11.12. Nivelación trigonométrica (4)

Como vimos anteriormente, si visamos directamente a un punto del techo, haremos $m'=0$. En este caso, el desnivel también está medido con relación al techo de la labor.

10.3.1.- Nivelación geométrica

Se emplea en los casos en que los requerimientos en precisión altimétrica sean grandes. Se realizan itinerarios altimétricos con nivel, independientes de los planimétricos, tal como se hace en topografía exterior. Las miras empleadas suelen ser más cortas (2 ó 3m) para poder situarlas en el interior de las labores.

Se aplica el método del punto medio, estacionando el nivel en un punto aproximadamente equidistante de aquellos cuyo desnivel se quiere determinar. Las miras se sitúan en el piso, normalmente sobre los carriles del transporte, si se hace por vía férrea. En ocasiones se nivela por el techo, utilizando miras que cuelgan desde éste.

Nivelación por el piso de la labor

Se estaciona en un punto intermedio E , visando sucesivamente a una mira situada en los puntos A y B cuyo desnivel pretendemos determinar (figura 11.13):

$$Z_A^B = m_A - m_B$$

Y la altitud de B se calcula, a partir de la de A , mediante:

$$Z_B = Z_A + Z_A^B$$

Empleando el método del punto medio, cada punto que se nivela se refiere al anterior, no al punto de estación. Por tanto, no es necesario señalar de forma permanente los puntos de estación utilizados.

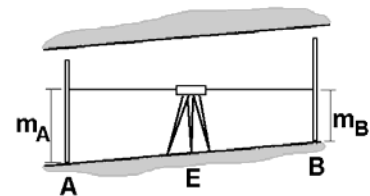


Fig. 11.13. Nivelación geométrica (1)

Nivelación por el techo de la labor

En este caso (figura 11.14) la Z de los puntos se refiere al techo de la labor, no al suelo. Las miras se cuelgan de las señales situadas en el techo. Hay que tener en cuenta que las miras se sitúan al revés, con el origen en el techo.

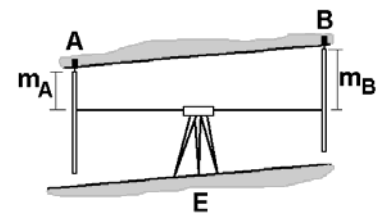


Fig. 11.14. Nivelación geométrica (2)

En este caso, la expresión a emplear es la siguiente:

$$Z_A^B = m_B - m_A$$

Y la altitud de B se calcula, a partir de la de A , como en los casos anteriores:

$$Z_B = Z_A + Z_A^B$$

11.4.- TOMA DE AVANCES

Se pretende levantar topográficamente los avances de la explotación con una cierta periodicidad, al menos mensual. Si se trata de tajos de extracción de mineral y estéril, que van a seguir avanzando posteriormente, los requerimientos de precisión no suelen muy grandes. Si se trata de labores de interconexión entre otras labores previas, lo que se conoce como *rompimientos mineros*, la precisión en el replanteo y en el seguimiento de los trabajos es vital. Los rompimientos mineros se estudiarán en detalle más adelante.

Es importante que los técnicos responsables de los trabajos topográficos estén bien informados de los avances que se han ido produciendo en los frentes desde que se hizo el levantamiento anterior. También es conveniente revisar los frentes antes de levantarlos, para comprobar que los puntos de estación no han sido afectados por las voladuras o por otras causas. Esto permitirá, cuando llegue el momento oportuno, realizar el trabajo topográfico en el menor tiempo posible y no entorpecer las labores de extracción.

La toma de avances se realiza a partir de las estaciones de los itinerarios que se han levantado con anterioridad.

En el caso más sencillo (figura 11.15) se dispone de una estación e próxima al frente y de otra estación anterior d , visible desde ésta y siendo conocidas las coordenadas de ambas. Estacionando en e y lanzando una visual a d , que nos puede servir para orientar el instrumento topográfico o para calcular la corrección de orientación, tendremos datos suficientes para calcular las coordenadas de los puntos del frente que visemos a continuación (1 a 4 en la figura 11.15).

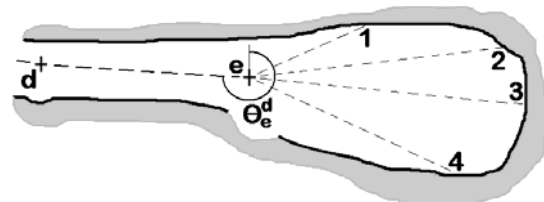


Fig. 11.15. Toma de avances desde la estación e del itinerario

Cuando las labores son de difícil acceso, podemos situar dos puntos próximos al frente desde los que levantaremos el frente por intersección directa. Otra posibilidad es emplear una estación total láser, como hemos comentado antes.

Si el punto e se encuentra alejado y el frente no es visible desde él, podemos hacer lo siguiente:

- Si la distancia no es muy grande (figura 11.16) estacionamos en e , lanzamos la visual de espaldas a d y, a continuación levantamos una estación destacada e' , desde la que se domine bien el frente. Estacionando luego en e' lanzamos una visual de espaldas a e , para transmitir la orientación, y levantamos los puntos del frente.
- Si la distancia es grande, levantamos un itinerario de relleno apoyado en e hasta llegar a las proximidades del frente. Normalmente se trata de un itinerario abierto. Desde la última estación del itinerario levantamos el frente, procediendo como en el caso anterior.

En todos los casos necesitamos que esté señalada la estación d , de coordenadas conocidas y visible desde e . Si esta estación hubiese desaparecido, habrá que reconstruir el itinerario entre la primera estación disponible y la estación e . A partir de ahí, se opera como en los casos anteriores.

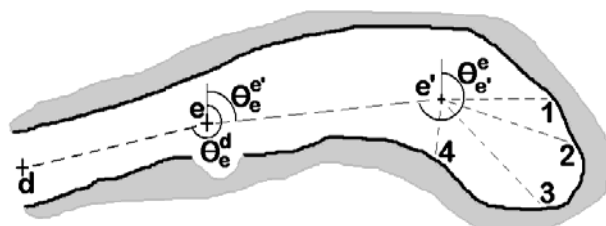


Fig. 11.16. Toma de avances desde una estación destacada e'

12. ENLACE ENTRE LEVANTAMIENTOS SUBTERRÁNEOS Y DE SUPERFICIE

12.1.- INTRODUCCIÓN

Los trabajos topográficos de interior deben ir referidos al mismo sistema de coordenadas empleado en el levantamiento de superficie. Los levantamientos de exterior se enlazan con la red geodésica a partir de los vértices geodésicos, cuyas coordenadas geográficas y UTM han sido calculadas con gran precisión. Para los levantamientos subterráneos se precisa de puntos situados en el interior y cuyas coordenadas (en el mismo sistema UTM) se calculan con suficiente precisión.

A partir de estos puntos se podrán enlazar los levantamientos subterráneos con los de superficie. Se aplicarán los métodos explicados en el capítulo 11, fundamentalmente itinerario y radiación para la planimetría y nivelación geométrica y trigonométrica para la altimetría.

Mención especial merece la transmisión de orientación, que a menudo exige la aplicación de procedimientos específicos diferentes de los de exterior, por la naturaleza y la dificultad de las labores subterráneas. La orientación se habrá transmitido cuando dispongamos, en interior, de dos puntos visibles entre sí y cuyas coordenadas, o el acimut de la alineación que forman, se conozcan.

12.2.- COORDENADAS

Necesitamos determinar las coordenadas X , Y y Z (UTM) de, al menos, un punto situado en el interior y a partir del cual se pueda realizar el levantamiento de las labores. Dependiendo del tipo de comunicación, o comunicaciones, con el exterior podemos tener los siguientes casos:

Comunicación por rampa

Basta con realizar un itinerario siguiendo la rampa, hasta dar coordenadas a un punto del interior. Conviene que el itinerario sea cerrado, de ida y vuelta, para que se pueda comprobar y compensar.

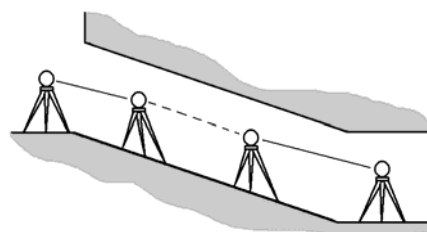


Fig. 12.1. Comunicación por rampa

Si se necesita bastante precisión en altimetría, conviene realizar además un itinerario por nivelación geométrica, que también debe ser cerrado. La altitud de los puntos de interior se determinará gracias a este itinerario.

Comunicación por pozo vertical

Las coordenadas X e Y se transmiten al interior mediante una plomada. Las coordenadas del hilo de la plomada se determinan en el exterior, enlazándolas con el levantamiento de superficie. Las coordenadas planas del hilo en el interior serán las mismas.

Si se dispone de distanciómetro o estación total, capaz de lanzar una visual vertical, se pueden determinar simultáneamente las tres coordenadas del punto de estación en el interior. Naturalmente, la precisión depende de la nivelación del aparato, es decir, de que la visual sea realmente vertical.

Si no se dispone de este equipo, la Z se puede determinar, a partir de la de exterior, midiendo la profundidad del pozo con hilo de acero o cinta metálica.

Comunicación por rampa y pozo o por dos pozos

En estos casos se pueden calcular las coordenadas de dos puntos de interior, uno a través de cada una de las labores de comunicación. Posteriormente se puede realizar un itinerario encuadrado, de interior, entre los dos puntos cuyas coordenadas se han determinado. Este itinerario, si es posible orientarlo, nos permitirá comprobar las coordenadas y, muy especialmente, que la transmisión de orientación es correcta.

En el caso de la figura 12.2, se han calculado las coordenadas de la estación interior I , mediante un itinerario por la rampa, a partir del punto exterior E . Enlazamos, con un itinerario de interior, los puntos I y P . Este itinerario se puede orientar lanzando una visual desde I a la estación anterior A del itinerario de la rampa. Si las coordenadas de P se habían determinado también, a partir del pozo, nos servirán como comprobación.

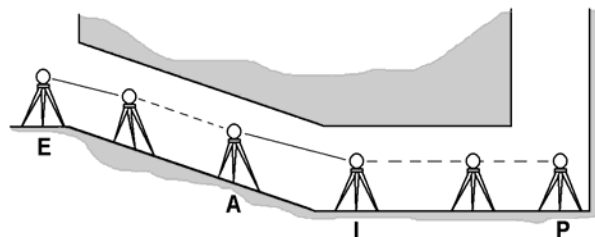


Fig. 12.2. Comunicación por rampa y pozo

12.3.- TRANSMISIÓN DE ORIENTACIÓN

La transmisión de orientación al interior es una operación especialmente delicada, ya que condiciona la precisión de todos los trabajos subterráneos. Las precauciones deben extremarse al máximo, pues cualquier desviación se transmite a los itinerarios y, en definitiva, a todo el levantamiento de interior. En ocasiones se dispone de procedimientos para determinar el error, pero otras veces (comunicación por un solo pozo) la comprobación no es posible.

En el caso de rompimientos mineros el problema puede tener consecuencias graves, al impedir que las labores previstas "calen" correctamente. En apertura de túneles que se excavan desde ambos extremos, e incluso desde puntos

intermedios a través de pozos, es imprescindible un replanteo exterior preciso del eje del túnel y una medición correcta de la profundidad de los pozos. Además, la transmisión de orientación a través de los pozos debe garantizar que la excavación del eje del túnel se orienta con suficiente precisión.

La transmisión de orientación es más o menos complicada según el número y el tipo de comunicaciones existentes entre interior y exterior. En función de éstas, del tipo de instrumentos disponibles y de la precisión requerida, emplearemos uno u otro de los siguientes métodos:

- itinerario enlazado con el exterior
- métodos magnéticos
- métodos ópticos
- métodos mecánicos
- métodos giroscópicos.

12.3.1- Transmisión de orientación mediante itinerario enlazado con el exterior

Es el caso de una mina a la que se accede desde el exterior por una rampa. Un itinerario cerrado, comenzando en un punto del exterior previamente conocido, nos permitirá calcular las coordenadas de uno o más puntos en el interior. La orientación se consigue, desde la estación de interior, visando a la estación anterior del itinerario, ya que ambas tienen coordenadas conocidas.

12.3.2- Transmisión de orientación por métodos magnéticos

Los métodos magnéticos constituyen el procedimiento más sencillo para orientar las labores de interior. Se basan en la propiedad de una aguja imantada, sujeta por su centro y pudiendo girar libremente, para orientarse según las líneas del campo magnético terrestre.

Estos métodos no suponen ninguna complicación práctica pero, como se ha visto en 10.2.2, presentan inconvenientes importantes:

- Su precisión es limitada.
- Miden rumbos, no acimutes.
- No se deben usar en zonas que presenten anomalías magnéticas, provocadas por la existencia de minerales metálicos o por la maquinaria e instalaciones de interior.

En todos los casos será preciso determinar la declinación magnética, para poder transformar en acimutes los rumbos que hayamos calculado. Como sabemos, la declinación varía con el tiempo y con el lugar de medición, por lo que debe calcularse en la zona y en el momento en que se vayan a realizar las mediciones de interior.

Para declinar un instrumento magnético, se estaciona en uno o más vértices del exterior y se lanzan visuales a alineaciones de acimut conocido, determinando el rumbo de cada alineación. La diferencia entre cada rumbo medido y el acimut correspondiente nos da un valor de la declinación. Tomamos como resultado

el valor promedio, siempre que no se hayan detectado valores aberrantes que puedan ser debidos a una anomalía magnética.

Los métodos magnéticos no son muy empleados, por las razones anteriores y porque, siempre que sea posible, se prefiere emplear instrumentos más rápidos y precisos en levantamientos de interior. Entre los instrumentos magnéticos empleados, podemos citar los siguientes:

- Brújulas y brújulas colgadas.- Son instrumentos cuya apreciación puede llegar a 5 o 10'. En brújulas excéntricas debe tenerse en cuenta la excentricidad a la hora de determinar los rumbos.
- Declinatorias.- Son agujas imantadas montadas sobre un taquímetro. Permiten orientarlo al Norte magnético, poniendo el limbo horizontal a cero en la dirección señalada por la aguja. De esa manera, el taquímetro puede medir rumbos directamente.
- Teodolitos-brújula.- Más precisos que los anteriores, pudiendo llegar a apreciaciones de 1'.
- Magnetómetros.- Consiguen apreciaciones de 20 a 30". En este instrumento se sustituye la aguja imantada por un imán que cuelga de un hilo de cuarzo y las oscilaciones se perciben por reflexión de un rayo de luz en un espejo unido al hilo. Los *declinómetros* son aun más precisos y están dotados de un hilo de suspensión de platino-iridio.

12.3.3- Transmisión de orientación por métodos ópticos

Estos métodos se basan en materializar, por procedimientos ópticos, un plano vertical que contiene a dos puntos fijos del exterior y a otros dos puntos fijos del interior. El acimut de la alineación formada por los puntos exteriores, que puede medirse con ayuda de los vértices exteriores, coincidirá con el de la alineación de interior que, de esta manera, queda orientada.

Mediante teodolito, taquímetro o estación total

El instrumento debe estar perfectamente nivelado y su eje de colimación, al cabecear el anteojo, debe describir un plano vertical. Esta condición puede verificarse mediante el doble giro del anteojo o visando en toda su longitud el hilo de una plomada en reposo colgada de un punto fijo.

La transmisión de orientación puede realizarse con el instrumento en el exterior o en el interior.

a) Desde el exterior.- El instrumento a emplear debe ser capaz de lanzar visuales al nadir, lo que nos es muy frecuente. Se estaciona sobre la boca del pozo *P* y se visa una alineación exterior *P-A* de acimut conocido. A continuación, se cabecea el anteojo, visando al nadir, y, siguiendo las instrucciones del operador, unos ayudantes tienden en el fondo del pozo un hilo *H-I*, tan largo como permita la anchura del pozo

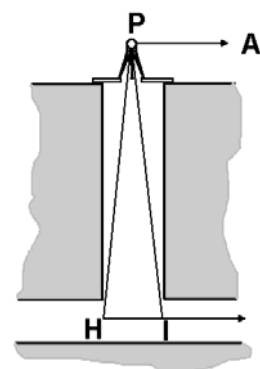


Fig. 12.3. Métodos ópticos: desde el exterior

(figura 12.3).

El hilo debe quedar contenido en el plano vertical descrito por el eje de colimación, que es el mismo plano vertical que contiene a la alineación exterior. Lo comprobamos siguiéndolo en toda su longitud, usando únicamente el movimiento de cabeceo del anteojo.

Este método es complicado y sólo puede emplearse en pozos de poca profundidad, ya que a partir de $100m$ es difícil percibir imágenes nítidas en el interior.

Para la puesta en estación habrá que montar dos plataformas independientes en la boca del pozo, una para el instrumento y otra para el operador, con las aberturas necesarias para poder lanzar las visuales al nadir.

b) Desde el interior.- En este caso, el instrumento debe ser capaz de lanzar visuales al cenit y admitir anteojos acodados. Se estaciona en el fondo del pozo y se visa una alineación $F-A$ interior. Esta será la dirección cuyo acimut se va a determinar. Empleando únicamente el movimiento de cabeceo del anteojo, se visa al cenit y se marcan dos puntos M y N en la boca del pozo (figura 12.4).

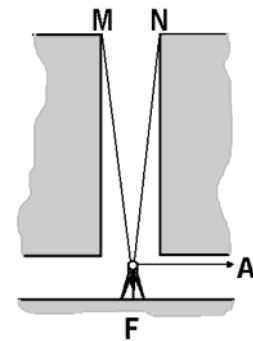


Fig. 12.4. Métodos ópticos: desde el interior

Estos puntos estarán situados en el mismo plano vertical que contiene a la alineación $F-A$. El acimut de la alineación $M-N$, que coincide con el de la $F-A$, se determina en el exterior.

Este método, como el anterior, sólo es recomendable para pozos anchos y poco profundos.

Mediante anteojos cenit-nadir

Estos equipos se conocen también con el nombre de *plomadas ópticas de precisión*. Se trata de instrumentos capaces de lanzar visuales al nadir. La precisión que se puede conseguir con ellos depende de la sensibilidad del sistema de nivelación que incorporen, ya que el resultado será tanto mejor cuanto más se aproxime a la vertical la visual lanzada.

Se estaciona el instrumento, sucesivamente, en dos puntos del borde del pozo A y B tan alejados entre sí como sea posible (figura 12.5). Las visuales permiten marcar los dos puntos de interior a y b situados en las verticales de A y B . Como la alineación interior $a-b$ está contenida en el mismo plano vertical que la exterior $A-B$, su orientación será la misma.

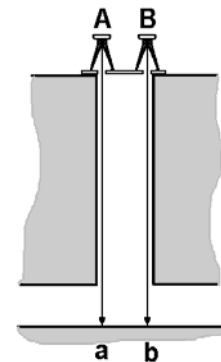


Fig. 12.5. Anteojos cenit-nadir

Este sistema puede ser más preciso que el anterior,

pero no debe emplearse para profundidades de más de 200m, porque los errores provocados por la refracción atmosférica empiezan a ser relevantes para esa profundidad.

Equipos láser

Estos equipos permiten lanzar una luz láser en la dirección del eje de colimación. La ventaja respecto a los anteriores es que la luz láser es visible cuando se proyecta sobre un objeto, lo que permite marcar los puntos visados directamente.

Montados sobre una estación total, situada en el fondo del pozo y perfectamente nivelada, no hará falta emplear oculares acodados ya que la luz es visible en una plataforma situada sobre la boca del pozo y permite marcar puntos.

Como en los casos anteriores, la precisión del sistema depende de que la nivelación del instrumento sea precisa. Conviene verificarlo mediante el doble giro del antejo o visando en toda su longitud el hilo de una plomada en reposo colgada de un punto fijo.

12.3.4- Transmisión de orientación por métodos mecánicos

Se basan en el empleo de plomadas, que permiten proyectar al interior, a lo largo de un pozo, los puntos medidos en el exterior. Con dos plomadas en reposo se puede materializar un plano vertical. Si medimos en el exterior el acimut de la alineación formada por los dos hilos de las plomadas, lo que resulta sencillo, habremos determinado la orientación de esa misma alineación en el interior. Esta orientación se transmite, ya desde el interior, a otra alineación fija, por ejemplo la formada por dos estaciones del itinerario de interior.

Dependiendo de la profundidad del pozo, se emplean plomadas con lastres de entre 10 y 50kg de peso e hilos de hierro dulce o acero de entre 0,5 y 2mm de diámetro. El hilo va enrollado en un torno provisto de freno y se hace pasar por una polea fija en la superficie.

Para atenuar las oscilaciones de las plomadas y lograr que estén en reposo lo más rápidamente posible, se introducen los lastres en depósitos, situados en el fondo del pozo y llenos de agua o aceite. Los hilos deben iluminarse correctamente, empleando una lámpara para cada uno y pantallas de papel o plástico de distinto color.

Antes de comenzar la operación de orientación conviene verificar que la trayectoria de los hilos es perfectamente vertical, es decir, que no tocan ningún saliente del pozo. Para ello se mide la distancia entre ellos en el exterior y en el interior, comprobando que ambas distancias coinciden.

Métodos directos de orientación

Consisten en estacionar el instrumento topográfico (teodolito, taquímetro o estación total) de forma que su eje principal esté contenido en el plano vertical formado por los hilos de dos plomadas (figura 12.6).

En exterior calculamos el acimut $\theta_H^{H'}$ de la alineación formada por los hilos H y H' . Para ello, por intersección o itinerario, calculamos las coordenadas de un punto E próximo al borde del pozo. El punto E se habrá elegido de forma que esté contenido en el plano vertical formado por los hilos de las plomadas. Al estacionar en él comprobaremos que esta condición se cumple.

Visando a otro punto conocido del exterior conseguimos orientar el instrumento (o calcular la corrección de orientación) y visando a las plomadas calculamos el acimut de la dirección que definen.

En interior estacionamos el instrumento en un punto I , también contenido en el plano vertical de las plomadas y situado a cierta distancia de ellas. Visando en la dirección de las plomadas, cuyo acimut conocemos por haberlo medido en el exterior, podemos orientar el instrumento. Finalmente, visamos a otro punto P , midiendo el acimut de la alineación $I-P$. Los dos puntos se habrán marcado de forma permanente y queda así constituida una base interior de acimut conocido.

La operación se puede realizar tangenteando los hilos o bisecándolos. Es importante que las plomadas se cuelguen de forma que sigan aproximadamente la dirección de la labor en la que están los puntos I y P , para que I se pueda situar a cierta distancia de ellas.

Métodos trigonométricos

a) Empleo de dos plomadas. Una sola estación.- Una vez colocadas las plomadas y determinado en el exterior el acimut de la alineación que forman $\theta_H^{H'}$, se hace estación en el punto interior I y se visa a los hilos de las plomadas H y H' , determinando por diferencia de lecturas el ángulo γ (figura 12.7). Para determinarlo con precisión, es recomendable utilizar los métodos de repetición o de reiteración. A continuación se visa a otro punto P previamente señalado. La alineación $I-P$ es la que vamos a orientar.

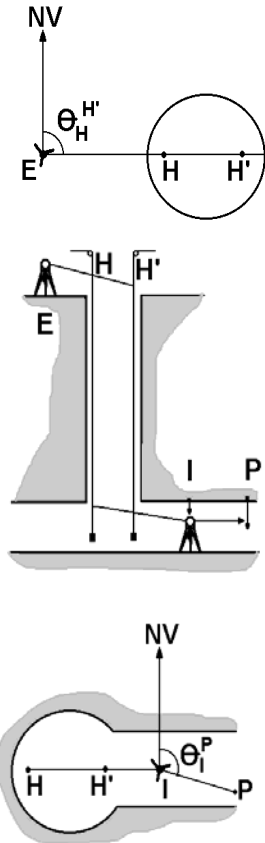


Fig. 12.6. Métodos mecánicos (1)

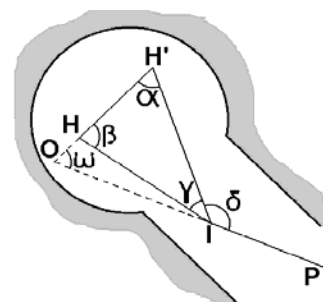


Fig. 12.7. Métodos mecánicos (2)

Medimos también las distancias reducidas $D_{HH'}$, entre los hilos, y D_{IH} , entre el punto de estación y el hilo H . Para calcular el acimut θ_I^P de la alineación $I-P$ necesitamos calcular el ángulo ω que forman las prolongaciones de las alineaciones $H-H'$ e $I-P$. Aplicando el teorema del seno en el triángulo $HH'I$:

$$\text{sen } \alpha = \frac{D_{IH}}{D_{HH'}} \text{sen } \gamma$$

En el triángulo OIH' :

$$\alpha + \omega + (200^g - \delta) = 200^g$$

$$\omega = \delta - \alpha$$

Una vez calculado ω , obtenemos el acimut buscado θ_I^P sumando o restando el valor de ω al acimut de la alineación de los hilos $\theta_H^{H'}$.

El inconveniente principal de este sistema es que exige medir las longitudes, lo que resulta incómodo y poco preciso

b) Empleo de dos plomadas. Dos estaciones.- Se marcan dos estaciones interiores I_1 e I_2 . Si es posible, conviene situarlas como en la figura 12.8, una a cada lado de las plomadas H y H' . Desde cada estación se visa a la otra y a los dos hilos, obteniendo por diferencia de lecturas los ángulos α , β , γ y δ (figura 12.8).

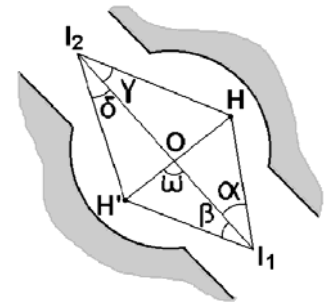


Fig. 12.8. Métodos mecánicos (3)

Aplicando el teorema del seno en los triángulos HOI_1 y $H'OI_1$:

$$\frac{OI_1}{\text{sen}(\omega - \alpha)} = \frac{OH}{\text{sen } \alpha}$$

$$\frac{OI_1}{\text{sen}(\omega + \beta)} = \frac{OH'}{\text{sen } \beta}$$

de donde:

$$\frac{OH}{OH'} = \frac{\text{sen } \alpha \text{sen}(\omega + \beta)}{\text{sen } \beta \text{sen}(\omega - \alpha)} \quad (1)$$

Aplicando el teorema del seno en los triángulos HOI_2 y $H'OI_2$:

$$\frac{OI_2}{\text{sen}(\omega - \delta)} = \frac{OH'}{\text{sen } \delta}$$

$$\frac{OI_2}{\text{sen}(\omega + \gamma)} = \frac{OH}{\text{sen } \gamma}$$

de donde:

$$\frac{OH}{OH'} = \frac{\text{sen } \gamma \text{ sen}(\omega - \delta)}{\text{sen } \delta \text{ sen}(\omega + \gamma)} \quad (2)$$

Igualando (1) y (2), tenemos:

$$\frac{\text{sen } \alpha \text{ sen}(\omega + \beta)}{\text{sen } \beta \text{ sen}(\omega - \alpha)} = \frac{\text{sen } \gamma \text{ sen}(\omega - \delta)}{\text{sen } \delta \text{ sen}(\omega + \gamma)}$$

y desarrollando:

$$\frac{\text{sen } \alpha (\text{sen } \omega \cos \beta + \cos \omega \text{sen } \beta)}{\text{sen } \beta (\text{sen } \omega \cos \alpha - \cos \omega \text{sen } \alpha)} = \frac{\text{sen } \gamma (\text{sen } \omega \cos \delta - \cos \omega \text{sen } \delta)}{\text{sen } \delta (\text{sen } \omega \cos \gamma + \cos \omega \text{sen } \gamma)}$$

Dividimos numerador y denominador del primer miembro por $\text{sen } \alpha$, $\cos \omega$ y $\text{sen } \beta$ y los del segundo miembro por $\text{sen } \gamma$, $\cos \omega$ y $\text{sen } \delta$:

$$\frac{\text{tg } \omega \cot g \beta + 1}{\text{tg } \omega \cot g \alpha - 1} = \frac{\text{tg } \omega \cot g \delta - 1}{\text{tg } \omega \cot g \gamma + 1}$$

y desarrollando:

$$\begin{aligned} \text{tg}^2 \omega \cot g \beta \cot g \gamma + \text{tg } \omega \cot g \beta + \text{tg } \omega \cot g \gamma + 1 = \\ = \text{tg}^2 \omega \cot g \alpha \cot g \delta - \text{tg } \omega \cot g \alpha - \text{tg } \omega \cot g \delta + 1 \end{aligned}$$

de donde, finalmente:

$$\text{tg } \omega = \frac{\cot g \alpha + \cot g \beta + \cot g \gamma + \cot g \delta}{\cot g \alpha \cot g \delta - \cot g \beta \cot g \gamma}$$

Una vez calculado ω , podemos obtener el acimut de la alineación formada por las estaciones I_1 e I_2 a partir del acimut medido en el exterior $\theta_H^{H'}$.

c) Empleo de tres plomadas.- Las tres plomadas se sitúan alineadas y equidistantes. Esto se consigue haciendo pasar los hilos por agujeros calibrados realizados en una vigueta metálica. Se estaciona en I , situado a una distancia de H' que sea el doble aproximadamente de la distancia entre hilos (figura 12.9). Como en los casos anteriores, el problema queda resuelto calculando α , ya que:

$$\omega = \gamma + \delta - \alpha$$

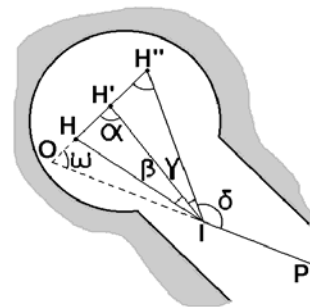


Fig. 12.9. Métodos mecánicos (4)

y los ángulos β , γ y δ se miden con el instrumento topográfico al estacionar en I y visar a los tres hilos.

En el triángulo $IH'H''$:

$$\frac{H'H''}{\text{sen } \gamma} = \frac{IH''}{\text{sen}(\alpha - \gamma)}$$

y en el IHH' :

$$\frac{HH'}{\text{sen } \beta} = \frac{IH''}{\text{sen}(\alpha + \beta)}$$

Dividiendo las dos ecuaciones:

$$\frac{H'H'' \text{ sen } \beta}{HH' \text{ sen } \gamma} = \frac{\text{sen}(\alpha + \beta)}{\text{sen}(\alpha - \gamma)}$$

y como las plomadas son equidistantes $HH' = H'H''$

$$\frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \gamma} = \frac{\text{sen}(\alpha + \beta)}{\text{sen}(\alpha - \gamma)}$$

de donde:

$$\text{sen } \beta \text{ sen}(\alpha - \gamma) = \text{sen } \gamma \text{ sen}(\alpha + \beta)$$

Desarrollando:

$$\text{sen } \beta \text{ sen } \alpha \text{ cos } \gamma - \text{sen } \beta \text{ cos } \alpha \text{ sen } \gamma = \text{sen } \gamma \text{ sen } \alpha \text{ cos } \beta + \text{sen } \gamma \text{ cos } \alpha \text{ sen } \beta$$

$$\text{sen } \alpha (\text{sen } \beta \text{ cos } \gamma - \text{sen } \gamma \text{ cos } \beta) = \text{cos } \alpha (\text{sen } \gamma \text{ sen } \beta + \text{sen } \gamma \text{ sen } \beta)$$

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{cos } \alpha} = \frac{\text{sen } \gamma \text{ sen } \beta + \text{sen } \gamma \text{ sen } \beta}{\text{sen } \beta \text{ cos } \gamma - \text{sen } \gamma \text{ cos } \beta} \quad \text{tg } \alpha = \frac{2 \text{ sen } \gamma \text{ sen } \beta}{\text{sen}(\beta - \gamma)}$$

12.3.5- Transmisión de orientación por métodos giroscópicos

El giróscopo es un aparato ideado por Foucault, en 1852, para demostrar que la dirección de la meridiana y la latitud de un lugar se pueden medir a partir de la rotación de un cuerpo en la superficie terrestre.

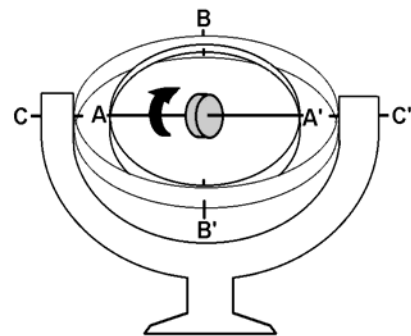


Fig. 12.10. Giróscopo

Consta de una masa M que gira a gran velocidad alrededor de un eje $A-A'$, sujeta por una suspensión cardán que permite que el eje pueda ocupar cualquier posición (figura 12.10). Si no existen fuerzas externas, el giro de M hace que el eje $A-A'$ se mantenga en una posición inalterable.

Pero al actuar también el movimiento de rotación de la Tierra, el eje $A-A'$ describe una superficie cónica (movimiento de precesión) alrededor de una paralela al eje de la Tierra trazada por el centro de M . Si se fuerza al eje $A-A'$ a mantenerse horizontal, el movimiento de precesión se transforma en una oscilación al Este y al Oeste de la meridiana, lo que nos permitirá determinar la dirección de ésta. Esto se consigue suspendiendo un giro-motor (que gira a gran

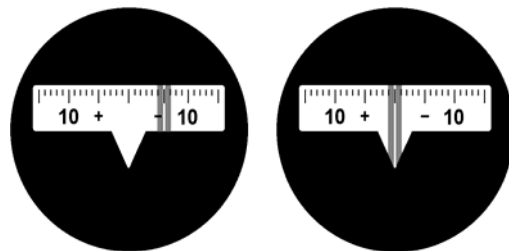


Fig. 12.11. Retículo de un giroteodolito

velocidad) de una cinta metálica, para que la gravedad lo obligue a mantenerse horizontal.

Los giróscopos van montados sobre un teodolito o una estación total y disponen de un ocular por el que se observa un retículo graduado (figura 12.11). Las oscilaciones pueden apreciarse en el retículo gracias a una señal luminosa que oscila con el giro-motor. Cada semioscilación dura unos 4 minutos, por lo que es posible seguirla, actuando sobre el tornillo de coincidencia del movimiento particular del teodolito, de forma que la señal luminosa se mantenga en el centro de la escala del retículo.

Antes de cambiar de sentido, la señal permanece parada unos segundos lo que nos permite anotar la lectura U_1 del limbo horizontal del teodolito. Repetimos la operación para la segunda semioscilación, obteniendo la segunda lectura U_2 . Para una orientación precisa, anotaremos un mínimo de dos oscilaciones completas (figura 12.12). Según Schuler, la posición de la meridiana se obtiene a partir de:

$$N_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_1 + U_3}{2} + U_2 \right)$$

$$N_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_2 + U_4}{2} + U_3 \right)$$

$$\dots$$

$$N = \frac{\sum N_i}{n}$$

N será la lectura del limbo acimutal que corresponde a la visual a la meridiana. Para referir la orientación al norte de la cuadrícula UTM será necesario calcular la convergencia (véase 5.3).

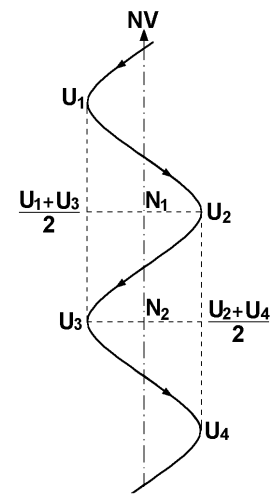


Fig. 12.12. Orientación con giroteodolito

Antes de comenzar la operación, el anteojo del teodolito debe estar orientado aproximadamente al Norte verdadero. Esto se consigue con una brújula (previamente declinada) o con alguno de los métodos de orientación rápidos (pero menos precisos) que permiten los giróscopos.

La precisión de este método está entre 10^s y 1^m .

13. ROMPIMIENTOS MINEROS

13.1.- INTRODUCCIÓN

Se denomina *rompimiento minero* a la operación consistente en comunicar dos puntos determinados, pertenecientes a labores de interior ya existentes en la mina, por medio de una nueva labor. Las características del rompimiento dependerán de las posiciones relativas de los dos puntos a comunicar. Además, es frecuente que el rompimiento deba cumplir determinadas condiciones impuestas de antemano.

Dependiendo de las posiciones de los puntos, una nueva labor recta puede ser horizontal, vertical o inclinada:

- En el primer caso, se trata de comunicar puntos situados en el mismo plano horizontal mediante una galería.
- En el segundo, se trata de puntos situados en la misma línea vertical, que se comunicarán mediante un pozo o una chimenea.
- Cuando los puntos no están situados en el mismo plano horizontal ni en la misma línea vertical, la comunicación se hará por una rampa o una chimenea inclinada.

Por otra parte, las condiciones impuestas supondrán que el rompimiento pueda resolverse mediante una labor recta (horizontal, vertical o inclinada) o que haya que emplear curvas (circulares o de otro tipo) que pueden estar contenidas en un plano horizontal o tener una determinada inclinación.

La nueva labor puede acometerse por uno de sus extremos (ataque) o por los dos simultáneamente (ataque y contraataque). A veces se emplean también puntos de ataque intermedios.

El cálculo de un rompimiento supone determinar, en función de las coordenadas de los extremos y del tipo de trazado (recto o curvo), la longitud, la orientación, la inclinación, etc. del eje de la labor a perforar.

Los trabajos necesarios se pueden dividir en tres fases:

- Trabajos de campo.- Consisten en realizar el levantamiento topográfico (si no se hubiera hecho previamente) necesario para determinar, con la mayor precisión posible, las coordenadas de los puntos extremos y las de todos los puntos auxiliares que nos servirán para el replanteo.
- Trabajo de gabinete.- Cálculo del rompimiento: orientación, longitud, inclinación, etc. Si se trata de una labor en curva, habrá que calcular las características de ésta: radio de curvatura, puntos de entrada y de salida, tangentes, etc. Si el ataque se va a realizar desde dos o más puntos, habrá que realizar los cálculos correspondientes a cada uno de ellos.

- **Replanteo.-** Consiste en realizar el marcaje y el seguimiento de la labor, a medida que ésta se excava, para guiarla adecuadamente. El replanteo se adaptará al ritmo de avance de la excavación para evitar desviaciones que, frecuentemente, son difíciles de corregir.

La primera fase, trabajo de campo, se desarrolla aplicando los métodos topográficos de interior que se han explicado en los capítulos precedentes.

13.2.- **ROMPIMIENTOS EN POZOS**

Es el caso de la perforación de un pozo vertical, para el acceso o la extracción de mineral y estéril, o de la reprofundización de un pozo, para alcanzar zonas más profundas del criadero.

La labor topográfica no se limita a proporcionar los elementos de dirección de la excavación y de seguimiento de la misma. También se ocupa de dirigir al equipo que ha de colocar las guías y raíles sobre las que se mueven las jaulas o los skips de extracción, las tuberías de agua y aire comprimido, los cables eléctricos, etc.

Además, conviene realizar un levantamiento geológico del terreno atravesado por el pozo en su avance, que será de gran interés para la planificación minera.

13.2.1.- **Cálculo del rompimiento**

Cuando se trata de un pozo nuevo, o de la reprofundización de uno antiguo que no está en uso, el cálculo resulta muy sencillo. Las coordenadas planas (X e Y) de los extremos del pozo coinciden y la profundidad será la diferencia entre la coordenada Z del punto inicial y la del punto final del mismo.

Si se trata de reprofundizar un pozo en el que no se puede interrumpir la marcha normal, habrá que proyectar y excavar labores auxiliares. En el ejemplo de la figura 13.1, se excava una pequeña galería horizontal (travesía) y, en su extremo, un pocillo auxiliar. Desde el fondo de éste, se excava una nueva travesía que nos lleva debajo del fondo del pozo antiguo, dejando un macizo de protección. A partir de aquí se inicia el avance, eliminando el macizo de roca cuando sea preciso.

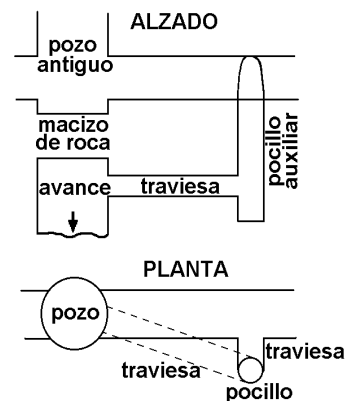


Fig. 13.1. Reprofundización de pozos

Los cálculos a realizar, en este caso, corresponden al rompimiento en línea recta y se verán en los apartados siguientes.

13.2.2.- **Replanteo de pozos**

La entibación definitiva del pozo se va realizando a medida que este avanza. Por tanto, no será fácil corregir la dirección si ésta no ha sido bien guiada. Esto nos

obliga a replantear la dirección del pozo de manera muy precisa desde el primer momento.

Métodos mecánicos: El replanteo se realiza mediante plomadas similares a las empleadas para transmitir la orientación a lo largo del pozo. Como sabemos, los lastres se pueden sumergir en agua o aceite para amortiguar rápidamente las oscilaciones de las plomadas.

a) Pozos estrechos.- Para pozos cuya mayor dimensión es inferior a 3 metros se cuelgan dos plomadas H y H' cuyos hilos se sitúan a una distancia entre 10 y 30cm de la pared del pozo (figura 13.2).

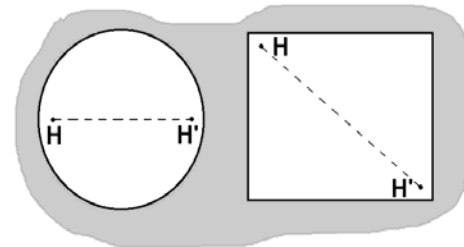


Fig. 13.2. Replanteo de pozos (1)

La orientación del plano de las plomadas se determina en el exterior, en caso necesario, para transmitir la orientación. En pozos circulares, las plomadas se sitúan según un diámetro. En pozos cuadrados o rectangulares, se sitúan según una de las diagonales. A partir de ellas, los operarios fijan la distancia a las paredes del pozo mediante calibres.

b) Pozos anchos.- Para pozos de mayor sección se cuelgan cuatro plomadas H , H' , I e I' . En pozos circulares se sitúan según dos diámetros perpendiculares entre sí y en pozos cuadrados o rectangulares se sitúan según las dos diagonales (figura 13.3). Los planos de las plomadas se orientan desde el exterior, si es necesario.

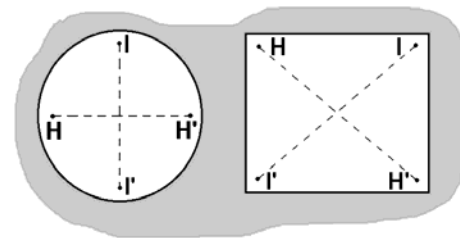


Fig. 13.3. Replanteo de pozos (2)

En todos los casos conviene levantar un corte geológico, representando los terrenos atravesados por el pozo y marcando todos los detalles relevantes. Se trata del plano vertical obtenido al desarrollar el cilindro constituido por las paredes del pozo y orientado gracias a la situación de las plomadas, que también se representan en él.

Métodos ópticos: También es posible emplear para el replanteo equipos capaces de señalar una dirección vertical, como los anteojos cenit-nadir o los equipos láser.

Se sitúan centrados en el borde del pozo, sobre una estructura estable, y tienen la ventaja de que no interrumpen los trabajos de perforación y de entibado. Como sabemos, su precisión depende de la puesta en estación y su alcance es limitado, por lo que sólo pueden emplearse en pozos de poca profundidad.

13.3.- ROMPIMIENTOS EN LÍNEA RECTA

Se trata de comunicar dos puntos, cuyas coordenadas se conocen de antemano, por una labor cuyo eje es una línea recta y que puede ser horizontal, si los dos puntos tienen la misma altitud, o inclinada.

13.3.1.- Cálculo del rompimiento

Para poder guiar la excavación de la nueva labor, necesitamos calcular su orientación, la longitud a perforar y la pendiente.

Supongamos dos puntos A y B que serán los extremos de una galería recta que pretendemos excavar (figura 13.4). Conocemos las coordenadas (X_A, Y_A, Z_A) (X_B, Y_B, Z_B) de ambos puntos. Si el ataque se va a realizar desde A , necesitamos conocer la orientación de la alineación $A-B$ para poder guiar la perforación. En el caso de la figura:

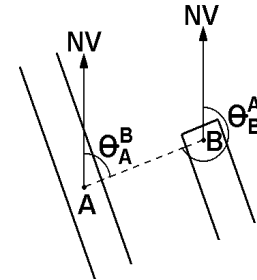


Fig. 13.4. Galería recta (1)

$$\theta_A^B = \text{arc tg} \frac{|X_B - X_A|}{|Y_B - Y_A|}$$

Si el ataque se realiza desde B :

$$\theta_B^A = 200^g + \text{arc tg} \frac{|X_B - X_A|}{|Y_B - Y_A|} = \theta_A^B \pm 200^g$$

La longitud de la nueva labor, en distancia natural, será:

$$D_N = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}$$

Normalmente necesitaremos conocer la correspondiente distancia reducida:

$$D_R = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}$$

El desnivel entre los puntos A y B viene dado por la diferencia de sus coordenadas Z . Hay que tener en cuenta que si los dos puntos tienen distinta altitud, la labor tendrá una cierta inclinación, ascendente o descendente, cuyo signo hay que indicar claramente para evitar errores. Si el ataque se realiza desde A , la pendiente de la labor vendrá dada por:

$$p = \frac{Z_B - Z_A}{D_R}$$

que tendrá signo positivo si la labor es ascendente y negativo en caso contrario.

En ocasiones se precisa enlazar dos galerías, continuando la excavación desde B y de manera que la longitud excavada desde A sea la menor posible. Esto supone que la labor $A-C$ ha de ser perpendicular a la $B-C$. En el caso de la figura 13.5, será:

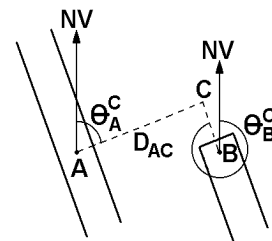


Fig. 13.5. Galería recta (2)

$$\theta_A^C = \theta_C^A \pm 200^g$$

$$\theta_C^A = \theta_C^B + 100^g$$

ya que las dos labores a excavar han de ser perpendiculares. Como el acimut de la galería B-C es conocido, calculamos la orientación de la labor A-C.

Para calcular las longitudes a perforar haremos:

$$X_C = X_A + D_{AC} \operatorname{sen} \theta_A^C = X_B + D_{BC} \operatorname{sen} \theta_B^C \quad (1)$$

$$Y_C = Y_A + D_{AC} \operatorname{cos} \theta_A^C = Y_B + D_{BC} \operatorname{cos} \theta_B^C \quad (2)$$

De la igualdad (1):

$$D_{AC} = \frac{X_B - X_A + D_{BC} \operatorname{sen} \theta_B^C}{\operatorname{sen} \theta_A^C}$$

Sustituyendo D_{AC} en (2) tenemos:

$$Y_A - Y_B + (X_B - X_A + D_{BC} \operatorname{sen} \theta_B^C) \frac{\operatorname{cos} \theta_A^C}{\operatorname{sen} \theta_A^C} = D_{BC} \operatorname{cos} \theta_B^C$$

$$Y_A - Y_B + (X_B - X_A) \cot g \theta_A^C = D_{BC} (\operatorname{cos} \theta_B^C - \cot g \theta_A^C \operatorname{sen} \theta_B^C)$$

y finalmente:

$$D_{BC} = \frac{Y_A - Y_B + (X_B - X_A) \cot g \theta_A^C}{\operatorname{cos} \theta_B^C - \cot g \theta_A^C \operatorname{sen} \theta_B^C}$$

que nos permite calcular D_{BC} y las coordenadas de C. A partir de éstas y de las de A se puede calcular la distancia D_{AC} . Las distancias que aparecen en las expresiones anteriores son distancias reducidas.

13.3.2.- Replanteo de labores en línea recta

Una vez completados los cálculos del rompimiento se realiza el replanteo de la labor desde el punto o puntos de ataque. El replanteo consiste en marcar sobre el terreno los elementos necesarios para iniciar la excavación y para realizar el seguimiento de la misma. El espacio disponible al iniciar la labor suele ser reducido, por lo que a veces es recomendable hacer un replanteo provisional que luego se va afinando, a medida que avanza la labor.

Estacionamos en el punto conocido A y, con apoyo de un punto auxiliar P también conocido, orientamos el instrumento topográfico y visamos en la dirección de la futura labor A-B, cuyo acimut hemos calculado. Actuando únicamente sobre el movimiento de cabeceo del anteojo, señalamos los puntos A' y A'', que forman parte de la alineación, en los hastiales o en el techo (figura 13.6). La excavación deberá seguir la dirección señalada.

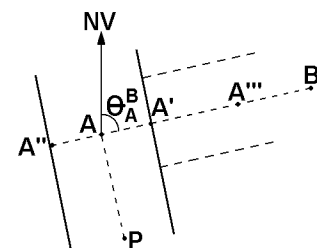


Fig. 13.6. Replanteo de galería recta

Para reducir errores conviene lanzar dos visuales a cada punto, una con el anteojo en posición normal y otra con el anteojo en posición invertida (tras aplicar la

regla de Bessel). Si existe una pequeña descorrección en el instrumento obtendremos dos lecturas ligeramente distintas, de las que tomaremos el valor intermedio.

Cuando la labor ha avanzado algunos metros se repite la operación, señalando nuevos puntos como el A'''. La operación se simplifica considerablemente utilizando oculares láser.

Para replantear la inclinación se marcan puntos en el techo o en los hastiales de la labor. Una forma de hacerlo es marcar cuatro puntos en los hastiales, situados 1 metro por encima de la posición teórica del piso. Uniéndolos con cuerdas se puede materializar un plano (rasante sobreelevada, figura 13.7) con la inclinación prevista para el piso de la labor y situado 1 metro por encima de éste.

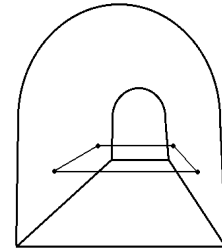


Fig. 13.7. Rasante sobreelevada

La dirección y la inclinación de la labor deben verificarse cada cierta distancia, para corregir posibles desviaciones. Si la precisión en altimetría ha de ser grande, conviene hacerlo utilizando un nivel.

13.4.- ROMPIMIENTOS EN CURVA

En ocasiones los rompimientos se resuelven mediante líneas curvas, que deben cumplir determinadas condiciones. Estas condiciones dependerán de las posiciones de los puntos a comunicar, pero también del uso que se vaya a dar a la nueva labor. Los radios de curvatura, por ejemplo, vendrán determinados por las características de la maquinaria que vaya a circular por ella. La curva puede estar contenida en un plano horizontal o tener también un desarrollo vertical y, en este caso, la pendiente máxima estará condicionada por las limitaciones impuestas por el transporte.

13.4.1.- Curvas circulares

Supongamos que queremos comunicar dos galerías $a-a'$ y $b-b'$ con una curva circular de radio R , impuesto por el proyecto, y tangente a ambas (figura 13.8). Vamos a suponer, además, que las galerías se sitúan en el mismo plano horizontal.

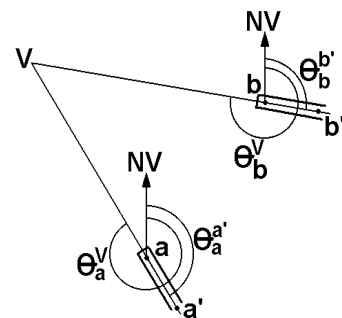


Fig. 13.8. Curva circular (1)

En primer lugar calculamos las coordenadas planas del punto V , intersección de las prolongaciones de las dos galerías. Para ello:

$$\theta_a^V = \theta_a^{a'} \pm 200^g$$

$$\theta_b^V = \theta_b^{b'} \pm 200^g$$

Las coordenadas de a y b son conocidas. Procediendo como en 13.3.1.:

$$X_V = X_a + D_{aV} \operatorname{sen} \theta_a^V = X_b + D_{bV} \operatorname{sen} \theta_b^V$$

$$Y_V = Y_a + D_{aV} \operatorname{cos} \theta_a^V = Y_b + D_{bV} \operatorname{cos} \theta_b^V$$

de donde:

$$D_{bV} = \frac{Y_a - Y_b + (X_b - X_a) \cot g \theta_a^V}{\cos \theta_b^V - \cot g \theta_a^V \operatorname{sen} \theta_b^V}$$

Con la distancia D_{bV} y el acimut θ_b^V calculamos las coordenadas del punto V .

Para calcular las coordenadas de A y B , puntos de entrada y salida de la curva circular, calculamos primero la tangente T . En el caso de la figura:

$$\beta = \theta_V^a - \theta_V^b$$

$$T = D_{VA} = D_{VB} = R \cot g \frac{\beta}{2}$$

$$\theta_V^A = \theta_V^a \quad \theta_V^B = \theta_V^b$$

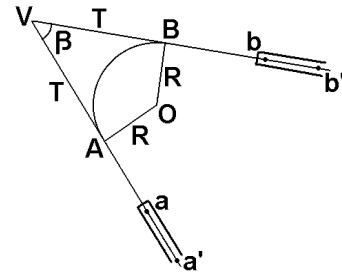


Fig. 13.9. Curva circular (2)

Con las distancias y los acimutes se calculan las coordenadas de A y B a partir de las de V (figura 13.9).

Como los radios son perpendiculares a las tangentes, tendremos:

$$\theta_B^O = \theta_B^b \pm 100^g$$

siendo O el centro de curvatura. La distancia entre O y B es el radio R . Por tanto:

$$X_O = X_B + R \operatorname{sen} \theta_B^O$$

$$Y_O = Y_B + R \operatorname{cos} \theta_B^O$$

Con estas coordenadas y las de A calculamos el θ_A^O y la distancia reducida, comprobando que coincide con el radio R .

Dando valores al ángulo γ de la figura calculamos las coordenadas de puntos P que pertenecen a la alineación curva (figura 13.10):

$$\theta_O^P = \theta_O^A \pm \gamma$$

$$X_P = X_O + R \operatorname{sen} \theta_O^P$$

$$Y_P = Y_O + R \operatorname{cos} \theta_O^P$$

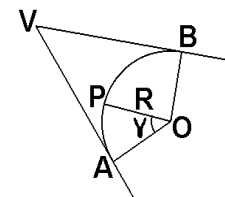


Fig. 13.10. Replanteo de curvas

Estas coordenadas se pueden emplear para replantear puntos de la curva desde los puntos de entrada A y salida B o desde cualquier otro punto conocido.

También podemos emplear los siguientes métodos:

Polígonos circunscritos.- Estacionamos un instrumento topográfico en el punto de entrada de la curva y prolongamos la tangente de entrada hasta un punto E , próximo al hastial pero que permita estacionar de nuevo el instrumento. Calculamos la distancia reducida

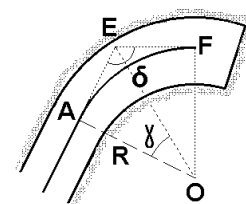


Fig. 13.11. Polígonos circunscritos

D_{AE} y determinamos el valor del ángulo γ (figura 13.11):

$$\gamma = \text{arc tg} \frac{D_{AE}}{R}$$

A continuación estacionamos en E y calculamos el ángulo δ , que viene dado por:

$$\delta = 200^g - 2\gamma$$

y, visando en esa dirección, llevamos la distancia $D_{AE} = D_{EF}$ y obtenemos el punto F , que forma parte de la curva. Para el siguiente punto, estacionamos en F , prolongamos la alineación $E-F$ y repetimos la operación anterior.

Polígonos inscritos.- Con este método todos los puntos de estación son puntos de la curva a replantar. Para aplicarlo, adoptamos una longitud de cuerda apropiada l , que podamos medir fácilmente, y calculamos el ángulo γ correspondiente mediante (figura 13.12):

$$\text{sen} \frac{\gamma}{2} = \frac{l}{2R}$$

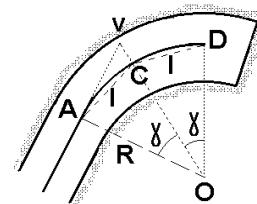


Fig. 13.12. Polígonos inscritos

Estacionamos en el punto de entrada A y determinamos la dirección de la visual al punto C , de manera que sea:

$$\angle \hat{A}C = \frac{\gamma}{2}$$

En esta dirección llevamos la longitud l y obtenemos el punto C . A continuación se estaciona en C y, para determinar la dirección del siguiente punto de la curva, D , materializamos el ángulo:

$$\angle \hat{A}CD = 200^g - \gamma$$

Sobre esta dirección llevamos la longitud l y obtenemos el punto D . Repetimos el procedimiento para obtener más puntos de la curva.

13.4.2.- Curvas circulares compuestas

Si las condiciones del rompimiento imponen los dos puntos de tangencia A y B y estos no equidistan de V , el enlace no puede resolverse mediante una curva circular pero sí mediante dos o más curvas de radios distintos.

Supongamos dos galerías $A-a$ y $B-b$ contenidas en el mismo plano horizontal y donde conocemos las coordenadas de los puntos A y B , impuestas por el proyecto (figura 13.13). El enlace con dos curvas circulares tiene infinitas soluciones y, para elegir una de ellas, fijaremos un valor arbitrario para el radio R_2 , adaptado a las limitaciones del trazado.

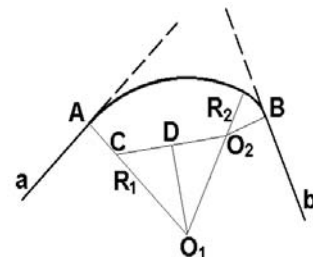


Fig. 13.13. Curvas circulares compuestas

Calculamos las coordenadas planas del centro de curvatura O_2 a partir de las de B , teniendo en cuenta que:

$$\theta_B^{O_2} = \theta_B^b \pm 100^g$$

ya que el radio y la tangente son perpendiculares, y que la distancia D_{BO_2} es igual al radio R_2 elegido.

Calculamos las coordenadas del punto C de la figura, de forma que la distancia D_{AC} coincida con el radio R_2 . El acimut será:

$$\theta_A^C = \theta_A^a \pm 100^g$$

Calculamos las coordenadas del punto D , promediando las de C y O_2 . Resolvemos el triángulo CDO_1 , calculando la distancia D_{CD} a partir de las coordenadas de C y D . El ángulo en C se calcula:

$$D\hat{C}O_1 = \theta_A^C - \theta_C^D$$

Calculamos el radio R_1 :

$$R_1 = R_2 + D_{CO_1}$$

A partir de aquí resulta sencillo calcular las coordenadas del segundo centro de curvatura O_1 y todos los datos necesarios para calcular el rompimiento y realizar su replanteo.

13.4.3.- Curvas parabólicas

Esta curva permite enlazar dos puntos A y B en el caso de que las tangentes sean distintas. Para replantear puntos del eje por coordenadas, vamos a aplicar las propiedades geométricas de la parábola (figura 13.14).

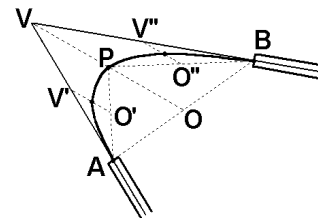


Fig. 13.14. Curvas parabólicas (1)

En primer lugar calculamos las coordenadas de V como en los casos anteriores. Promediando las coordenadas planas de A y B obtenemos las del centro O .

$$X_O = \frac{X_A + X_B}{2} \quad Y_O = \frac{Y_A + Y_B}{2}$$

Obtendremos las coordenadas de un punto P de la parábola promediando estas coordenadas con las de V :

$$X_P = \frac{X_O + X_V}{2} \quad Y_P = \frac{Y_O + Y_V}{2}$$

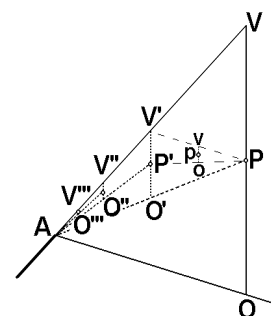


Fig. 13.15. Curvas parabólicas (2)

Para calcular otro punto P' , intermedio entre A y P , actuamos como si estos fuesen los dos puntos extremos de la curva (figura 13.15). Calculamos el nuevo vértice V' promediando las coordenadas de A y V y el nuevo centro O' promediando las de A y P : El punto P' se calcula:

$$X_{P'} = \frac{X_{O'} + X_{V'}}{2} \quad Y_{P'} = \frac{Y_{O'} + Y_{V'}}{2}$$

El punto p intermedio entre P y P' se puede calcular promediando las coordenadas de P y V' , para obtener el nuevo vértice v , y promediando las de P y P' para obtener las del nuevo centro o .

Por este método podemos calcular las coordenadas de tantos puntos como sea necesario, a ambos del punto central P . Conocidas las coordenadas de los puntos, el replanteo puede realizarse como en los casos anteriores.

13.4.4.- Curvas helicoidales cilíndricas

Se trata de enlaces por curvas cuya proyección horizontal es un arco de circunferencia y que comunican dos puntos A y B situados a distinta altitud. Es un caso frecuente en explotaciones con acceso al subsuelo por una rampa, por la que deben circular vehículos automotores. En ocasiones la labor puede suponer uno o varios giros completos.

El cálculo y el replanteo, en planimetría, se desarrolla como en las curvas circulares horizontales. Se entiende que los parámetros de la curva circular que hemos calculado corresponden a la proyección horizontal de la curva helicoidal que, como hemos dicho, será un arco de circunferencia (figura 13.16).

Pero como los puntos extremos del rompimiento, A y B , no están a la misma cota, la nueva labor no será horizontal sino inclinada. Llamando α al ángulo en O formado por las proyecciones horizontales de los radios de A y de B , la longitud reducida del tramo curvo será:

$$L = \frac{2\pi R\alpha}{400^g}$$

Si la pendiente de la curva es constante, podemos calcularla mediante:

$$p = \frac{Z_B - Z_A}{L}$$

pero no es p la pendiente que vamos a emplear para el replanteo, ya que éste se realiza siguiendo tramos rectos. En el caso de la figura 13.16, la longitud del arco de circunferencia entre A y el punto C , será:

$$L_{AC} = \frac{2\pi R\gamma}{400^g}$$

y, por tanto, la altitud de C se calcula:

$$Z_C = Z_A + p L_{AC} = Z_A + p \frac{2\pi R\gamma}{400^g}$$

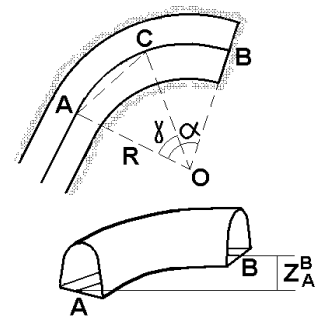


Fig. 13.16. Curvas helicoidales

y si l es la longitud reducida del tramo recto $A-C$, éste tendrá una pendiente:

$$p' = \frac{Z_C - Z_A}{l}$$

distinta de la pendiente p correspondiente a la curva. Esta pendiente p' es la que vamos a emplear para replantear la inclinación del rompimiento.