



TEMA 8 – LEVANTAMIENTOS SUBTERRÁNEOS

INTRODUCCIÓN¹

La topografía subterránea se realiza en **dos campos de la ingeniería, que son la minería y las obras civiles.**

Hay circunstancias en las que es necesaria la realización de un levantamiento topográfico subterráneo como ocurre en las explotaciones mineras, en las que es una obligación legal el mantener al día los planos de las labores, o en la obra civil, en el caso de ampliación o mejora de túneles, ya sean de carreteras, de ferrocarril, de canales, o de Metro y alcantarillado en las grandes ciudades.

En principio los trabajos subterráneos siguen las mismas pautas que los realizados en el exterior aunque con características especiales debidas a las condiciones mismas del trabajo bajo tierra.

La falta de luz natural obliga a utilizar aparatos con iluminación interior así como a identificar puntos a observar.

En ocasiones las galerías son estrechas y los aparatos no se podrán estacionar sobre trípode para no obstaculizar el paso de maquinaria y personal. También suelen ser sinuosas, con lo que el trabajo será lento. Incluso se han ideado aparatos para facilitar este tipo de trabajos.

Otros inconvenientes serán la humedad, los fuertes ruidos cuando hay maquinaria trabajando, o el silencio, la falta de ventilación, características del trabajo a las que el topógrafo deberá habituarse.

- **Los trabajos a que da lugar la minería son los siguientes:**
 - a) Los trabajos de acceso.
 - b) Los trabajos de preparación.
 - c) Los trabajos de explotación.

Los que en su conjunto, son generalmente designados por el nombre genérico de “labores mineras”.

Las labores de acceso son a partir de la superficie (socavones y pozos). Los socavones son labores mineras horizontales o casi horizontales (túneles), que parten de las laderas de una montaña y se desarrollan ya sea en el yacimiento mismo ó en roca estéril, para llegar al criadero.

Los pozos son excavaciones más o menos profundas, excavada en el



¹ TOPOGRAFIA APLICADA. Recopilación: Adrián Gustavo Sosa. Andrés Darío Ibazeta Alessi. UNS



suelo, cuyo objetivo es el proporcionar acceso o crear una conexión con el subsuelo.

- **Factores que deben tenerse en cuenta en los trabajos subterráneos.**

1. Iluminación .Por tener que trabajar en ausencia de la luz solar, el campo visual es oscuro, y por lo tanto se requiere contar con equipos de iluminación artificial (lámparas mineras, linternas, etc.).

En cuanto al instrumental topográfico, actualmente cuentan con iluminación propia, alimentados con baterías recargables o con pilas.

2. Temperatura. Al profundizar en el interior de minas, se observa un aumento de la temperatura con respecto a la profundidad, de un modo más o menos regular. Se observa, por término medio, que la temperatura aumenta en un grado por cada 33 mts.

A veces es necesario aclimatar el ambiente de trabajo por medio de ventilación artificial.

3. Presión barométrica. Varía en función directa de la profundidad. Se puede admitir una variación de unos 9 mm de columna de mercurio por cada 100 mts., por lo que se deduce que hacer una nivelación barométrica en el interior de minas, no puede ser utilizada con garantía.

4. Humedad. El aire de las galerías es con frecuencia muy húmedo, si a eso lo asociamos con temperaturas elevadas, el estado higrométrico tiene una importancia considerable para la respiración. Estas condiciones obligan a tener mayor cuidado con el instrumental topográfico.

5. Polvo. Los trabajos de voladuras en el arranque del mineral y otros en el interior provocan que el aire de la ventilación de las galerías transporte polvo. Ello puede provocar incluso explosiones en las minas de carbón.

En estas atmósferas húmedas, el polvo que se posa sobre los instrumentos topográficos forma una pasta abrasiva que los puede dañar. La solución consiste, en utilizar instrumentos fabricados con materiales no atacables y completamente estancos.

6. Gases Nocivos. Cuando el aire de la mina no es apto para la respiración o solamente con reparos, por su mayor contenido de gases irrespirables (CO_2 , N_2 , CH_4 , H_2), se le llama aire viciado, y si contiene mezclas venenosas se les llama aire tóxico (CO , H_2S , óxido de nitrógeno).

Cuando por la existencia de gases inflamables (CH_4 , hidrógenos carburados más elevados, como aparecen especialmente en incendios de minas como gases de combustión lenta, CO) poseen la capacidad de producir explosiones. En minería se les llama atmósferas explosivas.

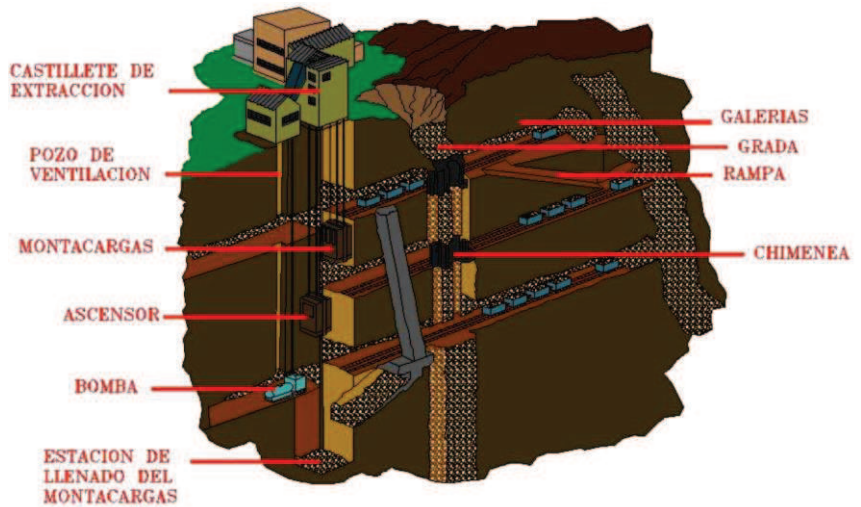
- **Planificación.**

Una mina subterránea requiere una red extensa y cuidadosamente planificada para que estas excavaciones puedan funcionar correctamente, lo que se conoce como trabajos de preparación. Esto incluye la realización de: pozos, galerías, rampas, chimeneas y coladeros



1. Pozos. Son excavaciones más o menos anchas y profundas, excavadas en el suelo, cuyo objetivo normal es el de proporcionar el acceso o crear una conexión con el subsuelo.

Este acceso puede ser utilizado para la extracción de la roca y mineral, personal y material de transporte, ventilación, etc. No son necesariamente verticales, algunos son inclinados, a veces siguiendo la pendiente de una veta para explotar. Lo más normal es que sean verticales y sus formas son: rectangular, circular o elíptica.



Los pozos circulares dan una buena resistencia a la presión de la roca y son fáciles de revestir con hormigón, y se usan más frecuentemente.

2. Profundidad. Los pozos de minas alcanzan frecuentemente varias centenas de metros de profundidad. En Sudáfrica hay explotaciones superiores a los 2.500 metros y en las minas de Cardona se llegó a explotar hasta los 1.200 m de profundidad. Las perforaciones para la prospección petrolífera descienden a más de 8.000 m.

La profundización de pozos es, en comparación con otras operaciones de preparación, un procedimiento complejo. La profundización requiere un juego completo de maquinaria especial, adaptada al proyecto. La profundización de pozos se trata frecuentemente, como un proyecto especial y es asignado a un contratista.

3. Revestimiento. A los pozos de extracción que serán utilizados durante muchos años se les aplica un revestimiento llamado "entibación". Esta entibación puede ser construida por materiales clásicos (madera, ladrillo u hormigón). También se emplean dovelas prefabricadas o tramos cilíndricos de fundición o de acero.



4. Galerías. Las galerías horizontales o inclinadas en una mina son utilizadas con varias finalidades: para la preparación de los túneles, exploración, acceso del personal a las explotaciones o frentes de trabajo, transporte del material, del mineral, etc. En ellas se instalan vías, bandas transportadoras, conducciones de agua y aire, cables eléctricos, etc..

Todas las galerías están dimensionadas para una finalidad específica, normalmente para acomodar equipos que se desplazarán o funcionarán dentro de las mismas. Esto concluye una relación entre las dimensiones del equipo y el perfil de la galería. Las galerías están diseñadas alrededor de las máquinas, tomando en consideración un



espacio libre requerido a paredes y techo, espacio para pasarelas, conductos de ventilación y líneas de servicio.

Los tamaños de galerías en operaciones de explotación han aumentado durante los últimos años, debido al cambio de equipo sobre carriles con máquinas a ruedas de goma.

Las galerías pequeñas son de forma rectangular mientras que las secciones más grandes están diseñadas con un techo de forma de arco, para mejorar la resistencia de apoyo de la roca.

Las galerías, cuando por las presiones del terreno lo requieran, son fortificadas mediante entibación.

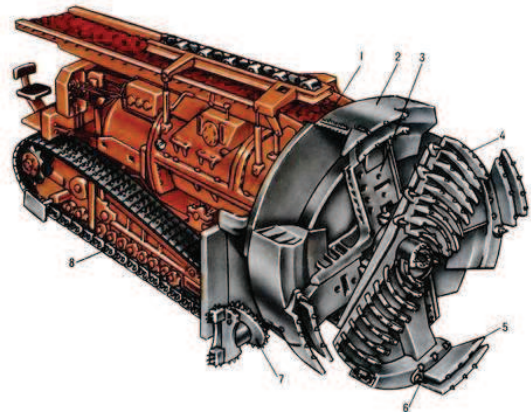
Cuando tenemos agua en el interior de la mina, la evacuación se realiza mediante canales de sección semicircular, rectangular o de trapecio, de anchura adecuada y con una pendiente muy regular.

5. Rampas. La rampa es la denominación de una galería inclinada. Las rampas han llegado a ser un elemento común en una disposición de preparación de una mina, al mismo tiempo que se realiza la conversión de equipos para uso con o sin carriles.

Las máquinas de accionamiento diesel sobre ruedas de goma que se usan ahora en muchas minas, funcionan sin carriles y pueden desplazarse por calzadas inclinadas.



Las rampas inclinadas de transporte se están convirtiendo, cada día más, en una característica común del desarrollo minero. Esta tendencia está ligada a la conveniencia, en las minas modernas, de utilizar máquinas auto-transportantes con motor diesel o eléctrico, ya que son muy costosas y tienen que ser utilizadas eficazmente. Su rápido y cómodo desplazamiento a las diferentes labores es de vital importancia.



Las rampas o planos inclinados sirven para las mismas finalidades que las chimeneas; es decir, como medios de comunicación entre niveles horizontales. La inclinación se encuentra entre el 14 % y el 10 %, lo que hace posible el simple y rápido movimiento de las máquinas de ruedas autopropulsadas.



No hay reglas fijas para determinar la inclinación de una rampa.



Las dimensiones de una rampa, en analogía con secciones de galería, son determinadas por las máquinas que se desplazan por la misma.

6. Escombreras o coladeros. Las chimeneas podríamos definir las como excavaciones estrechas, abiertas en el cielo en una labor de mina; sirven, pues, como conexión entre niveles horizontales, como paso para el mineral, el personal o para la ventilación.

No son necesariamente verticales: la inclinación máxima aceptable para la evacuación del mineral suele ser de unos 30° respecto a la vertical. La sección normal ronda los 3m^2 , y su forma es circular, cuadrada, incluso rectangular.

Se define como coladero el boquete que se deja en el entresuelo de una mina para echar por él los minerales al piso inferior y desde allí sacarlos afuera.

1. DISTRIBUCIÓN DE LA PLANIMETRÍA Y LA ALTIMETRÍA.

Todo levantamiento subterráneo debe apoyarse en una red exterior cuya función es dar coordenadas a todos los puntos de comunicación con el interior así como hacer el levantamiento de los detalles exteriores que se precisen.

La red exterior planimétrica constará de una triangulación, o un itinerario de precisión, o ambas cosas a la vez, según sea la extensión de la zona, y se intentará que los puntos de comunicación con el interior coincidan con vértices de la triangulación o el itinerario; en la actualidad, también los sistemas de posicionamiento global (GPS) son perfectamente utilizables para estos trabajos, siendo su mayor ventaja el menor número de puntos a determinar. La red altimétrica tendrá como objeto dar cota a estos puntos y a todos aquellos que se precisen.

La transmisión del trabajo del exterior al interior será directa, como simple prolongación de las redes tanto planimétricas como altimétricas al interior, en el caso de que la comunicación sea a través de rampas o escaleras o incluso sea por las bocas del túnel. Sin embargo, en ocasiones la comunicación será a través de pozos, sobre todo en el caso de minas; entonces el enlace constará de las siguientes fases:

- Desde el punto de vista planimétrico habrá que transmitir coordenadas y acimut por los métodos que se estudiarán más adelante.
- Y desde el punto de vista altimétrico se transmitirá la cota midiendo la profundidad del pozo.

Por último los trabajos en el interior constarán de un itinerario principal que se apoyará en los puntos transmitidos desde el exterior, unos itinerarios secundarios, para concluir con el levantamiento de los detalles. La red altimétrica interior dará cota a los vértices de los itinerarios.

2. TRABAJOS EN EL EXTERIOR

Como ya se ha dicho el objeto de estos trabajos es dar coordenadas (X, Y, Z) a todos los puntos de comunicación con el interior, y también el levantamiento topográfico de aquellas zonas de interés, como pueden ser en el campo de las explotaciones mineras, las edificaciones existentes en la concesión, las escombreras, las instalaciones de la propia explotación, etc.; en obra civil serán de interés las zonas que puedan verse



afectadas por algún proyecto provisional como pueden ser el proyecto de caminos de acceso a la obra, el montaje de una planta de hormigonado, oficinas, almacenes, etc.; o por algún proyecto definitivo (nuevos enlaces, variantes de la antigua carretera o línea férrea o canal.

Las escalas utilizadas en este tipo de trabajos son grandes, 1:1.000 o 1:500, e incluso en zonas concretas se utiliza la escala 1:200. Por ejemplo para el levantamiento topográfico de la zona de las boquillas de un túnel, o en levantamientos de precisión como son los de túneles ya construidos en los que se pretende proyectar el encaje de una vía férrea.

Si consideramos que en todo levantamiento se debe conseguir que cualquier punto representado tenga una precisión no inferior al error gráfico, la quinta parte del milímetro a la escala en la que estemos trabajando, nos daremos cuenta que una triangulación o bien un itinerario de precisión es imprescindible. Por ejemplo en trabajos a escala 1:200 en cualquier punto radiado se debe asegurar una precisión de $20/5$ cm., es decir de 4 cm.

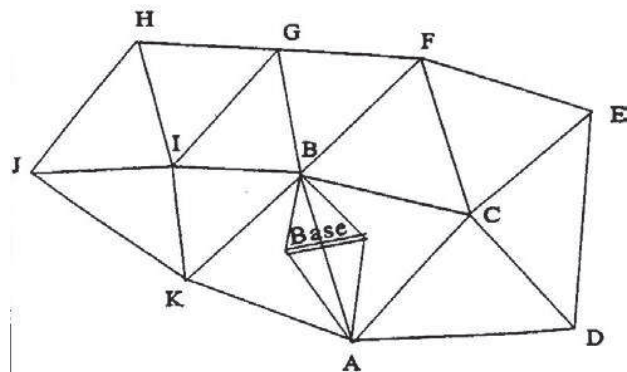
Según los medios de los que se disponga se decidirá el método topográfico a seguir en la observación de la red exterior. Si sólo disponemos de taquímetro lo más adecuado será la realización de una triangulación con el fin de asegurar la precisión requerida; si disponemos de una estación total de precisión adecuada, el método aconsejable podrá ser el itinerario.

2.1. Triangulación.

Se intentará que los vértices de la triangulación estén en las proximidades de los puntos de comunicación con el interior, o mejor aún, que coincidan con dichos puntos.

Seguirá las mismas pautas aplicadas a cualquier triangulación, es decir, que los triángulos sean lo más próximo a equiláteros, y en ningún caso existan ángulos inferiores a 25 g o superiores a 175 g.

Los lados de los triángulos en general suelen ser cortos, varios centenares de metros. La medición de la base, con cinta metálica o con estadía horizontal si no disponemos de distanciómetro, y su posible ampliación no ofrecerá ninguna dificultad; deberá ocupar un lugar centrado dentro de la triangulación y realizarse con la mayor precisión ya que no olvidemos que será el dato de partida para el cálculo de la triangulación, no midiéndose después más que ángulos.



La orientación de la base convendrá que sea astronómica, ya que nos servirá para comprobar la declinación de las brújulas y declinatorias que se puedan usar en el interior.

Si en la zona de trabajo o en sus proximidades existen dos vértices geodésicos los enlazaremos con la triangulación, con lo cual el acimut será conocido y además



trabajaremos en un sistema de proyección (UTM) que permitirá enlazar nuestro levantamiento con otros colindantes o con futuros proyectos.

2.2 Itinerario.

Las estaciones totales y los distanciómetros que existen actualmente en el mercado consiguen precisiones milimétricas en la medida de distancias, por lo que se suele sustituir la triangulación por un itinerario de precisión.

Este itinerario debe ser siempre encuadrado, es decir, que parta y que llegue a puntos de coordenadas conocidas, y en ningún caso se debe dejar colgado, volveríamos al punto de partida realizando entonces el llamado itinerario cerrado. Al igual que en el caso de la triangulación, lo enlazaremos con vértices geodésicos próximos a la zona.

El itinerario también será complemento de la triangulación cuando no se haya podido situar algún vértice de ésta en el punto de comunicación con el interior o no se hayan podido tomar detalles exteriores necesarios por falta de visibilidad. En estos casos el itinerario será de vértice a vértice de la triangulación.

2.3 Altimetría.

Las cotas trigonométricas que se han obtenido con el cálculo de la triangulación o del itinerario tienen precisión suficiente para dar cota a los puntos radiados en el levantamiento de los detalles exteriores.

Sin embargo será necesaria una nivelación por alturas que dé cota a los puntos de comunicación con el interior y a otros puntos, de los que se partirá cuando haya que realizar trabajos exteriores como el replanteo de rasantes de caminos o de rasantes de carriles, o para dejar cota de precisión en edificaciones o terrenos que se tema que puedan ser afectados por los hundimientos mineros en el caso de explotaciones mineras. Siempre que sea posible se partirá, en la realización del itinerario altimétrico, de puntos de Nivelación de Alta Precisión (NAP) y por supuesto la nivelación será cerrada entre dos puntos, o de ida y vuelta si sólo disponemos de uno conocido.

3. TRABAJOS DE ENLACE CON EL INTERIOR.

Cuando la comunicación con el interior sea por las bocas (extremos) de un túnel o bien por rampas en una explotación minera, la transmisión de los datos del exterior al interior será directa, como simple prolongación de los itinerarios exteriores, tanto planimétricos como altimétricos, al interior.

Pero cuando la comunicación sea a través de pozos, las dificultades serán mayores, debido a la escasa longitud de los tramos a transmitir, obligada por el diámetro de los pozos, y a la gran profundidad de éstos sobre todo en minería (varios centenares de metros).

A continuación se describirán, para una mayor claridad, los distintos procedimientos o métodos utilizados para la transmisión de la planimetría a través de un pozo, y posteriormente los utilizados para la transmisión de la altimetría, aunque se intuirá que en algún caso podría realizarse al unísono.

3.1. Transmisión de la planimetría



Consistirá en trasladar al menos dos puntos, uno de los cuales sea de coordenadas (X, Y) conocidas y defina con el segundo una línea de acimut conocido.

La precisión en la transmisión del punto de coordenadas conocidas dependerá de las necesidades impuestas por el tipo de trabajo a realizar y también del método utilizado. No obstante, la imprecisión obtenida se mantendrá como valor constante en la prolongación de los itinerarios interiores del túnel o de la mina, es decir, que no tendrá trascendencia en el levantamiento.

No ocurrirá lo mismo en la transmisión del acimut, ya que un error o una precisión inferior a la exigida, provocará un giro en el itinerario interior y el error cometido irá aumentando progresivamente hasta el final de dicho itinerario.

La transmisión del punto de coordenadas conocidas se suele efectuar dentro de las operaciones de transmisión del acimut, por lo que nos iremos refiriendo a esta fase en cada uno de los métodos de transmisión del acimut que a continuación se describen.

La transmisión del acimut es la operación más delicada y en la que deben extremarse al máximo las precauciones; como ya se ha comentado, un error en el acimut de partida imprime un giro a todo el itinerario, circunstancia posible de subsanar cuando el itinerario vaya encuadrado entre dos puntos conocidos. Pero si el itinerario fuese cerrado, por no haber más que una sola comunicación con el exterior, no habría medio de comprobar el giro.

Este defecto puede tener muy graves consecuencias en el caso de replanteos: si se trata de las galerías de una mina y el error es grande puede conducir a litigios por invadir alguna concesión colindante; si se trata del replanteo de túneles, los cuales se suelen excavar desde las dos bocas para encontrarse en el centro, un error provocaría un encuentro defectuoso o, peor aún, si el error es grande, podría ocurrir que ambos túneles se cruzasen.

3.1.1. Comunicación directa.

Cuando la transmisión del acimut se realiza por rampas o pozos inclinados, o como en el caso de túneles, por las bocas, o incluso por escaleras como en el del Metro, esta operación no ofrece grandes dificultades ya que se reduce a la simple prolongación de los itinerarios exteriores al interior, con un mayor o menor número de tramos según el caso.

3.1.2. Comunicación por un pozo.

Si la transmisión del acimut al interior de un túnel se lleva a cabo por pozos intermedios, o si se trata de orientar las labores mineras correspondientes a las diferentes plantas de un pozo vertical, el problema se complica y, según los medios de los que se disponga o de la precisión que se necesite, se le puede dar diferentes soluciones.

Los métodos usuales para la transmisión del acimut son los siguientes:

- a) Por medio de plomadas
- b) Con taquímetro o teodolito
- c) Con rayo láser
- d) Con brújulas o declinatorias
- e) Por métodos giroscópicos



El inconveniente común a todos los métodos de transmisión del acimut a través de un solo pozo, estriba en la corta longitud que puede tener el lado que sirve de base en el fondo de pozo, y que necesariamente es menor que el diámetro del mismo.

a) Por medio de plomadas

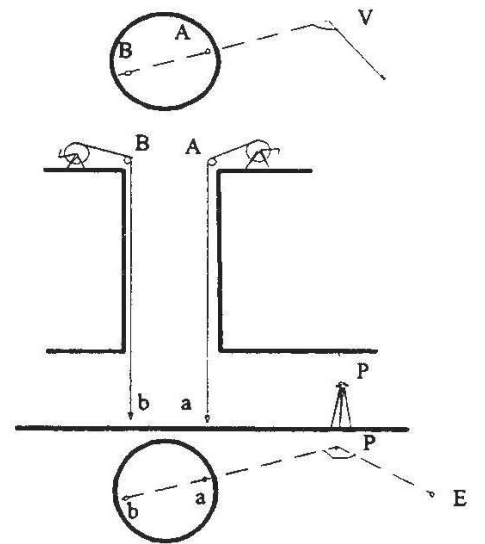
a.1 Con plomadas de gravedad

Son plomadas de gran peso que penden de un hilo de acero o de invar de 1 o 2 mm. de diámetro y de hasta 1.000 m de longitud. El hilo va enrollado en un tomo que dispone de freno para evitar un descenso muy rápido y para detenerlo en el momento que convenga.

Del extremo del hilo pende una plomada cuya misión es la de tensar dicho hilo. El peso de la plomada es proporcional a la profundidad del pozo, oscilando entre 15 Kg para profundidades de 100 m y 100 Kg para profundidades de 1.000 m (sólo alcanzables en explotaciones mineras).

Es el método clásico, aunque tiene el inconveniente de ser de realización lenta; consiste en utilizar dos plomadas que señalen un plano vertical cuyo acimut se determina desde el exterior y trasladarlo después al interior del túnel o galería mediante la observación de los hilos por medio del teodolito.

Para ello desde el punto V, punto de la red exterior más próximo a la boca del pozo, replanteamos la alineación VAB, siendo A y B dos poleas que alineamos desde V y por las que se hará pasar el hilo de las plomadas. Desde V visaremos a otro punto de la red exterior y mediremos el ángulo en V por lo que la alineación VAB será de acimut conocido. También mediremos la distancia VA, con lo que obtendremos las coordenadas de A.



con lo que obtendremos las coordenadas de A.

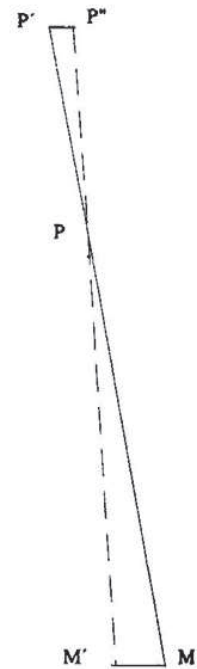
Los hilos de las plomadas que pasan a través de las poleas materializarán el plano vertical de acimut conocido, una vez que consigamos que cese la oscilación y alcancen su posición de equilibrio.

Para conseguir la estabilidad de los hilos se pueden acoplar unas aletas a las plomadas e introducirlas en una cubeta con algún líquido oleaginoso. Como ejemplos ilustrativos, en un pozo de 300 m. de profundidad al cabo de 1 hora las oscilaciones de las plomadas son prácticamente imperceptibles a través del teodolito; en el caso de un pozo de 500 m de profundidad al cabo de 3 horas la oscilación es inapreciable con el teodolito. Estas oscilaciones residuales son muy lentas, por lo que hay veces que para ganar tiempo se coloca una escala horizontal graduada en la parte posterior del hilo, se observan los extremos de la oscilación sobre la escala graduada y se sitúa el hilo vertical del retículo del aparato en el promedio de las lecturas.

Existen diversos métodos para una vez materializado el plano vertical de acimut conocido por medio de las plomadas en el fondo del pozo, trasladarlo al primer eje de nuestro itinerario interior:

a.1.1.Alineándose.

- Colocando el teodolito en la alineación por tanteos. Como se intuye por el título, colocándose el operador en línea con las plomadas, se estaciona el aparato en un punto aproximado. A continuación se visa a los hilos de las plomadas, observando cómo al enfocar a uno queda desenfocado el otro; es lo más probable que en un primer intento no se vean los hilos de las dos plomadas alineados, por lo tanto debe moverse el teodolito desplazándolo sobre la plataforma nivelante. Esta operación se repetirá tantas veces como sea necesario hasta conseguirlo.



Calculando el desplazamiento necesario para conseguir la alineación

Sean P y P' las dos plomadas y M' la posición del taquímetro en una primera aproximación. Si M es la posición correcta de éste, y P'' es la prolongación de la alineación M' P a la altura de P', por triángulos semejantes, podemos decir que:

$$M' M = \frac{P' P'' \times P M'}{P P'}$$

siendo conocidas las distancias PP' y la PM' por haberlas medido con anterioridad, teniendo un extremo cuidado en, al hacerlo, no tocar las plomadas, y P' P'' una distancia estimada al compararla con el grosor conocido del hilo de la plomada 'que debe aparecer en el campo del anteojo.

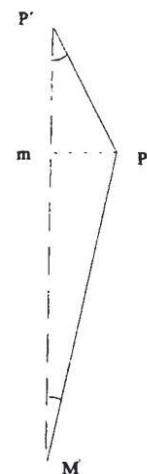
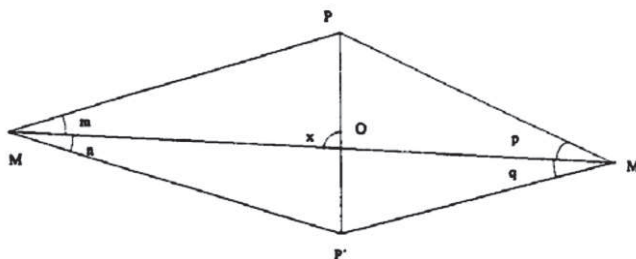
a.1.2) Midiendo el ángulo de error en M.

Sean P y P' las dos plomadas y M la posición del taquímetro. En el triángulo MPP', el ángulo en M lo leemos en círculo directo e inverso y varias veces. El ángulo en P' será la incógnita ya que una vez conocido es fácil deducir el acimut de la alineación P'M y trasladarlo a nuestro primer eje. Según la figura, siendo el ángulo en M y en P' muy pequeños y midiendo la distancia MP con una cinta, podemos decir que

$$mP = \frac{M'' \times MP}{r'}$$

$$mP = \frac{P' '' \times P' P}{r''}$$

- Estacionando a los dos lados del pozo



En este caso, la ventaja es que no intervienen las distancias para el cálculo del acimut. De los triángulos OPM y OP'M podemos deducir



$$\frac{OP}{\text{Seno } m} = \frac{OM}{\text{Seno}(x + m)} \qquad \frac{OP'}{\text{Seno } m} = \frac{OM}{\text{Seno}(x - n)}$$

Dividiendo estas dos igualdades:

$$\frac{OP \times \text{Seno } n}{\text{Seno}(x - n)} = \frac{OP' \times \text{Seno } m}{\text{Seno}(x + m)}$$

Y despejando, obtenemos:

$$\frac{OP \times \text{Seno}(x - n)}{\text{Seno } m} = \frac{OP' \times \text{Seno}(x + m)}{\text{Seno } n}$$

De la misma manera, de los triángulos OPM' y OP'M' deducimos que:

$$\frac{OP}{\text{Seno}(x + q)} = \frac{\text{Seno } p}{\text{Seno } q}$$

$$\frac{OP'}{\text{Seno}(x - p)} = \frac{\text{Seno } q}{\text{Seno } p}$$

Como los dos primeros miembros de las ecuaciones son iguales también lo serán los segundos.

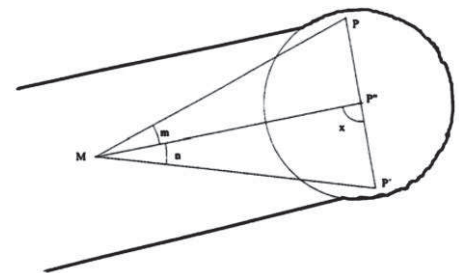
$$\text{Seno}(x - n) \times \text{Seno } m \times \text{Seno}(x - p) \times \text{Seno } q = \text{Seno}(x + q) \times \text{Seno } p \times \text{Seno}(x + m) \times \text{Seno } n$$

En esta ecuación hay una única incógnita que es el ángulo x, quitando denominadores, dividiendo por (seno x .cos x), haciendo el segundo miembro de la ecuación obtenida igual a cero y dividiendo por (seno n seno m seno p seno q), obtendremos la siguiente fórmula

$$\tan x = \frac{(\cotg m + \cotg n + \cotg p + \cotg q)}{(\cotg n \times \cotg p - \cotg m \times \cotg q)}$$

Conocido ahora el ángulo x, se deduce fácilmente el acimut de la alineación MM'

-Observando tres plomadas alineadas Las tres plomadas deberán estar en el mismo plano vertical y las de los extremos equidistantes de la central. La dirección que definen debe ser aproximadamente perpendicular al eje longitudinal del túnel o de la galería de acceso al pozo vertical.



En el triángulo MPP'':

$$\frac{PP''}{\text{Seno } m} = \frac{MP''}{\text{Seno}(x - m)}$$

De la misma manera, en el triángulo MP''P'

$$\frac{P'P''}{\text{Seno } n} = \frac{MP''}{\text{Seno}(x + n)}$$



Dividiendo estas dos igualdades miembro a miembro, y como las distancias PP'' y P''P' son iguales por construcción tendremos:

$$\text{Seno } n \times \text{seno } (x - m) = \text{seno } m \times \text{seno}(x + n),$$

expresión en que la única incógnita es el ángulo "x". Desarrollándola obtendríamos la siguiente fórmula:

$$\text{tg } x = \frac{(2 \times \text{seno } m \times \text{seno } n)}{\text{seno } (n - m)}$$

Conocido el ángulo x se deduce con facilidad el acimut de la alineación MP''.

En este caso que acabamos de describir, aunque no interviene en la fórmula la medida de las distancias entre las plomadas, es muy importante conseguir la máxima precisión en la igualdad de éstas, ya que la falta de precisión en este dato afectará a la transmisión del acimut y podría provocar un giro en todo el itinerario interior, mientras que una imprecisión en la medida de la distancia solo se trasladaría como valor constante.

Es obvio señalar que en todos los métodos que hemos expuesto, los ángulos deben medirse con la máxima exactitud, y que las lecturas deben hacerse en círculo directo e inverso y repetidas veces.

Una vez realizada la observación angular, más delicada, tomaremos la distancia al punto (plomada) de coordenadas conocidas. Obtendremos así las coordenadas del punto de estación y finalizaremos de esta manera la transmisión de la planimetría.

La precisión obtenida con el método de plomadas de gravedad es muy variable, dependiendo de la profundidad de los pozos, la ventilación, etc.

a.2) Con plomadas ópticas

Cuando la profundidad del pozo no excede de 200 m, se opta por utilizar plomadas ópticas de gran precisión o anteojos cenit-nadir. Son aparatos que, montados sobre la misma base nivelante del teodolito, son capaces de transmitir una visual al cenit, al nadir, o a ambas direcciones. La precisión obtenida varía entre 1 mm. a 30m, hasta 1 mm. a 100 m en los más sofisticados.

La condición de que la profundidad no sea excesiva (inferior a 200 m) se debe a que la visual se vea afectada por el aumento de la temperatura con la profundidad (grado geotérmico), además de la humedad y del polvo en suspensión. Todo ello origina una serie de perturbaciones en la visual (refracción, vibración de las imágenes, etc.)

Equipamiento

Plomadas láser

- Cómodo centrado y control de bases nivelantes y sensores respecto al punto de suelo o de techo. Al cambiar el taquímetro de trípode, el centrado de la plomada se controla sin problemas (en poligonaciones y medidas con centrado forzoso). Nivel tubular integrado para centrado y





puesta en horizontal precisos hasta 0,5 mm. Intensidad regulable del rayo láser. Empleo del dispositivo medidor de alturas para determinar la altura del instrumento en todos los modelos. Sustituye a la plomada óptica en la base nivelante.

Plomada óptica cenit y nadir



Plomada óptica cenit y nadir

406 853 ZNL Plomada cenit y nadir, en estuche
406 855 GSTP9 Reticulo

- Para plomadas cenit y nadir precisas en topografía, la y subterránea
- Centrado forzoso en la base nivelante
- Nivel tubular integrado
- Desviación típica: 1 mm a 30 m (1:30 000)



Plomadas ópticas de precisión

- Plomadas automáticas con compensador integrado
- Desviación típica: 0,5 mm a 100 m (1:200 000)

344 299 NL Plomada nadir automática, en estuche
364 664 GSTP6 Reticulo

- Para plomadas nadir de precisión en topografía, construcción sobre tierra y subterránea e industria

344 250 ZL Plomada cenit automática, en estuche
364 664 GSTP6 Reticulo

- Para plomadas cenit de precisión en topografía, construcción sobre tierra y subterránea, minería e industria

Acodado



Cualquiera de los métodos utilizados con las plomadas de gravedad puede ser seguido utilizando una plomada óptica, con la ventaja de poder transferir al fondo del pozo puntos. No obstante, también se puede estacionar en los mismos; de este modo la transferencia se hace de forma directa, sin necesidad de cálculo auxiliar alguno.

b) Uso del teodolito o taquímetro

Este método sólo es aplicable al caso de pozos poco profundos y de gran diámetro.



Por lo que respecta a la profundidad podemos resumir diciendo que hasta 100 m de profundidad las visuales ópticas son buenas, entre 100 y 200 m empiezan a ser regulares, y a partir de esta profundidad se producen altas vibraciones y mala calidad en las imágenes.

El fundamento del método es el mismo que en el caso anterior, con la diferencia de que el plano vertical se materializa con el teodolito, en lugar de utilizar las plomadas, de las siguientes maneras:

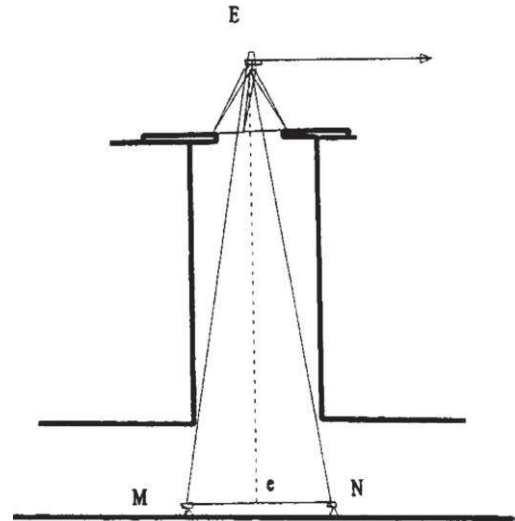
b. 1) Estacionando el teodolito en el exterior

El aparato empleado debe estar equipado con accesorios que le permitan efectuar visuales al nadir (ocular acodados, ocular para visual inclinada, prisma ocular...). Antiguamente se fabricaban teodolitos con anteojo excéntrico, lo que permitía efectuar este tipo de visuales leyendo el limbo en las dos posiciones del anteojo y calculando el promedio. Actualmente están en desuso.

Con el teodolito clásico la forma de operar es la siguiente: en la boca del pozo se construye un andamio para el teodolito, y una plataforma independiente para el operador, montando el trípode de manera que no estorbe a la realización de las visuales nadirales.

Siendo conocido el punto de estación y visando a otro también conocido, se define la alineación que queremos trasladar al interior.

Cabeceando el anteojo en dirección al nadir, bajo las indicaciones del operador, unos ayudantes tienden en el fondo un hilo metálico tenso y cuyos extremos puedan desplazarse, haciéndolo coincidir, en la mayor extensión posible, con el hilo vertical del retículo; en esta posición se señalan unos puntos M y N simétricos con respecto al eje principal del aparato.

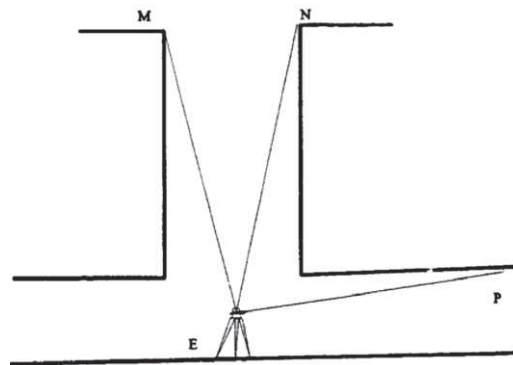


De esta manera hemos conseguido materializar en el fondo del pozo una alineación MN de acimut conocido y cuyo punto medio es de coordenadas conocidas.

b.2) Estacionando el teodolito en el fondo

También en este caso, el teodolito debe ir equipado con elementos que le permitan efectuar visuales cenitales. Estacionando el teodolito en el interior del pozo, dirigiremos la visual al primer punto de nuestro itinerario interior

(P) y después señalaremos por tanteos en la superficie los puntos M y N en el plano vertical que contenga a la visual a P. Enlazando los puntos M y N con la red exterior, obtendremos el acimut.





b.3) Utilizando el prisma pentagonal

El prisma pentagonal es un accesorio que se acopla en el objetivo del teodolito. Un contrapeso se coloca en el extremo del ocular. La montura del prisma puede girar por sí misma, y esta rotación hace describir al eje de puntería un plano perpendicular al eje óptico del anteojo.

Su principal utilización es la del traslado de una dirección dada a otro nivel. Para conseguir lo anteriormente expuesto se procederá de la siguiente manera:

Primeramente se construirá un andamiaje en la boca del pozo sobre el que se pueda estacionar el teodolito y que no dificulte la observación del fondo. También se construirá una plataforma independiente para el operador.

Sea “E” el punto de coordenadas conocidas sobre el que se estaciona el aparato, y “P” un punto de la red exterior, también de coordenadas conocidas (por lo tanto la alineación EP será de acimut conocido).

En el fondo del pozo se sitúan dos escalas, lo más alejadas entre sí posible y en una dirección que sea sensiblemente perpendicular a la de la orientación que se desea transmitir.

Se estaciona el teodolito en el punto E, con el prisma ya colocado en el objetivo del anteojo; se coloca la lectura 1009 en el limbo vertical; y se visa al punto P girando la alidada y basculando el prisma. En este momento se anota la lectura del limbo vertical que será sensiblemente 1009.

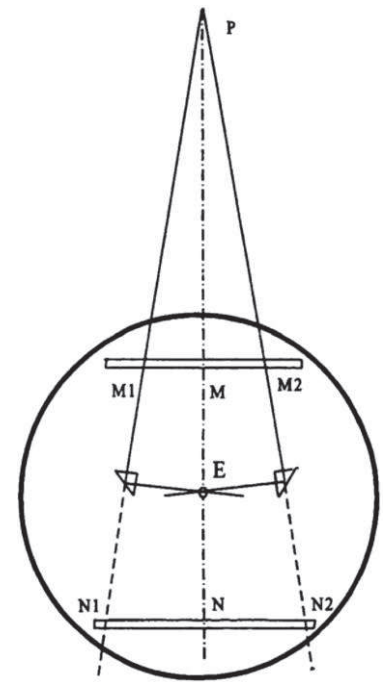
Se bascula el prisma, con precaución, hacia abajo hasta que aparezca la primera escala, y se anota la lectura M1 que marca el hilo vertical del retículo sobre dicha escala. Se prosigue el giro hasta ver aparecer la segunda escala, y se anota la lectura N 1.

A continuación se gira la alidada 200° y se busca nuevamente el punto P con pequeños movimientos horizontales y basculando el prisma hasta que aparezca en el campo óptico; se obliga a coincidir la lectura del limbo vertical con la leída en la posición anterior; se comienza a girar el prisma hacia abajo hasta conseguir de nuevo ver la primera escala y anotar la lectura M2, y ver la segunda y anotar la lectura N2.

Las medias (M y N) de las lecturas en cada escala, definen la dirección EP en el fondo del pozo, ya que lo que hemos conseguido materializar en el fondo, es la intersección con las escalas de dos planos simétricos respecto del plano vertical que pasa por la alineación de acimut conocido.

Repitiendo el proceso con una inclinación del anteojo ligeramente distinta, se obtiene un control de los valores medios M y N.

La precisión, según el fabricante, en una puntería es de 1,5 mm en 100 m.





c) Uso del rayo láser

El rayo láser materializa una visual que puede ser interceptada por una pantalla definiendo un punto, normalmente de color rojo. La aplicación del rayo láser en el campo de la topografía es cada vez mayor, consigue transmitir el haz láser en coincidencia con el eje de colimación del aparato. Este ocular láser permite materializar en el espacio cualquier dirección.

Si disponemos de un teodolito con ocular de rayos láser, la forma de operar será idéntica a la descrita para teodolito o taquímetro, con la ventaja de que puede utilizarse a mayor profundidad y de que la materialización de la señal, tanto si operamos desde el exterior como si lo hacemos desde el interior, es directa.

Si es a una plomada óptica de precisión o a un anteojo cenit-nadir a los que se les acopla el ocular láser, las ventajas serán las mismas.

También existen emisores láser que llevan acoplados un nivel tórico y que estacionados en unas plataformas especiales transmiten el rayo al cenit o al nadir, aunque no consiguen la precisión requerida para el tipo de trabajo del que estamos hablando a más de 100 m de profundidad. No obstante, existen algunos que permiten el giro alrededor de su eje vertical. En este caso, una vez calada la burbuja del nivel tórico, giraríamos lentamente el aparato un círculo completo comprobando que el punto luminoso en el fondo del pozo permanece inalterable en su posición, garantía de que el eje materializado por el láser es vertical. De no ser así el punto luminoso habría descrito un círculo cuyo centro sería el punto que buscamos.

d) Uso de brújulas y declinatorias

Debido a las perturbaciones magnéticas provocadas por los soportes metálicos, las líneas eléctricas, la mecanización de las explotaciones, los carriles de hierro, el uso de la brújula tiende a desaparecer. Sólo si las circunstancias lo permiten, la usaremos, ya que es el método más sencillo y cómodo para determinar el acimut.

El instrumento está formado, en general, por una brújula circular de anteojo céntrico, o bien excéntrico. El anteojo excéntrico permite hacer visuales nadirales y cenitales; el error debido a la excentricidad del anteojo se compensa visando al punto en las dos posiciones y anotando la lectura media.

Las brújulas, aun las más perfectas, no son instrumentos de precisión, pues su apreciación máxima es de 10'. Más precisos son los taquímetros con declinatoria, accesorio que se atornilla en el montante del teodolito y que permite la orientación del círculo horizontal hacia el norte magnético. Si la declinatoria lleva acodados los extremos de la aguja, de manera que se percibe la superposición de ambos, se puede conseguir una precisión de 5'. Otro instrumento es la brújula teodolito Wild "TO", el más pequeño de los fabricados por esta casa, y que permite apreciar el minuto centesimal. La particularidad de este modelo es que su limbo puede permanecer fijo, modo en el que se utiliza como teodolito, pero al desbloquear una palanca queda libre y se auto-orienta por ir solidario a un imán, convirtiéndose en brújula.

Cualquiera que sea el instrumento magnético utilizado, lo primero que haremos será comprobar la declinación. Para ello operaremos de la siguiente manera:



Con la Brújula:

Estacionaremos en un vértice de la triangulación exterior a media mañana, ya que la oscilación magnética diurna alcanza su valor medio a esta hora; visaremos a todos los vértices posibles, y a los rumbos leídos restaremos los respectivos acimutes, previamente calculados; el promedio de las diferencias será el valor de la declinación en ese momento. A continuación trasladaremos la misma brújula al fondo, leeremos el rumbo del primer eje del itinerario interior y restando la declinación obtendremos el acimut.



Con las declinatorias de los taquímetros:

Al igual que con la brújula, estacionaremos en un vértice de la triangulación a media mañana, señalaremos en el limbo la lectura cero y con el movimiento general del aparato calaremos la declinatoria (en este momento lo tendremos orientado al norte magnético); entonces con el movimiento particular observaremos a los otros vértices, obtendremos rumbos que restando a los acimutes calculados nos permitirá obtener el valor de la declinación.

Además de las declinatorias existe otro accesorio para el taquímetro mucho más preciso llamado magnetómetro, que va colocado encima del taquímetro; la brújula se ha sustituido por un imán que pende de un hilo de cuarzo y las oscilaciones se perciben por reflexión de un rayo de luz en un espejo unido al hilo. Con este aparato se consiguen precisiones del cuarto de minuto centesimal.

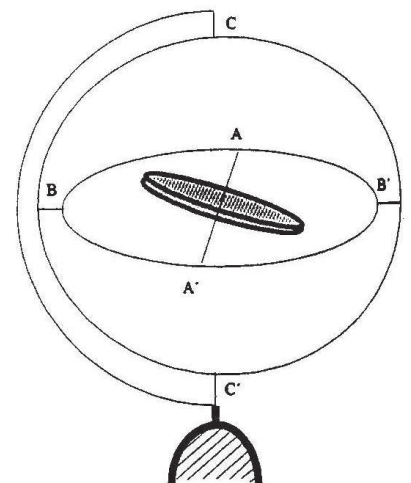
El magnetómetro se suele utilizar para obtener valores de la declinación en la superficie a distintas horas del día, mientras se trabaja en el interior utilizando brújulas.

Se deduce que en este caso, una vez transmitida la orientación al fondo del pozo, nos faltaría transmitir un punto de coordenadas conocidas. Para ello emplearíamos cualquiera de los métodos ya descritos: plomada de gravedad, anteojo cenit-nadir, o emisor de rayo láser.

e) Con teodolito giroscópico

En 1852, Léon Foucault acababa su exposición en la Academia de Ciencias francesa así: "Sin el concurso de un instrumento astronómico, la rotación de un cuerpo en la superficie de la tierra basta para indicar el plano meridiano y la latitud del lugar".

Su aparato, que él llamaba giróscopo, está formado por una masa pesada sujeta por una suspensión Cardan. A esta masa se le imprime un rápido movimiento de rotación alrededor de su eje AA' que va encajado en un doble soporte circular, el primero con eje horizontal BB' y el segundo con eje vertical CC' montado sobre el primero. El centro de gravedad de todo el sistema debe coincidir con el punto de intersección de los tres ejes.



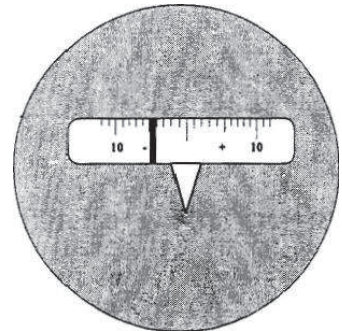


La inercia hace que la posición de partida del eje de giro AA' se mantenga inalterable mientras no existan fuerzas externas que la obliguen a cambiar de posición, para lo que se precisa hacer un esfuerzo. El movimiento de rotación de la Tierra actúa como fuerza perturbadora de la posición inicial del eje AA' y le obliga a describir una superficie cónica de revolución (movimiento de precesión) alrededor de la paralela al eje de la Tierra, trazada desde el centro del giroscopio.

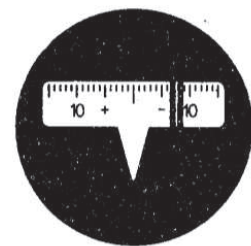
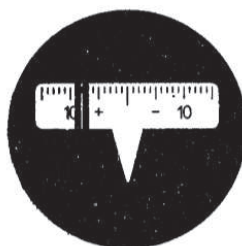
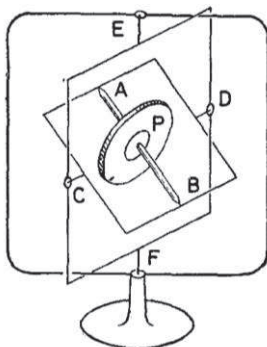
Fijando uno de los anillos de suspensión, se consigue que el eje se mueva solamente en el plano horizontal o en el vertical. En el primer caso el eje se mueve siguiendo la línea norte-sur geográficos, después de las oscilaciones que se amortiguan más o menos deprisa. En el segundo, el eje toma una inclinación variable con la latitud del lugar, y por ello puede medirse esta latitud.

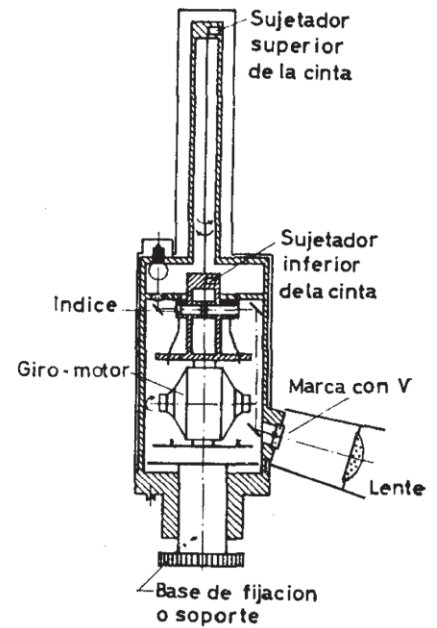
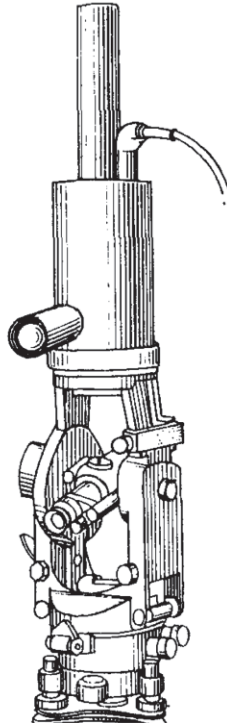
Una vez explicado el fundamento, se deduce que el "giroscopio direccional" nos puede llegar a dar directamente el acimut geográfico. Las primeras aplicaciones del invento de Foucault se realizaron en el campo de la navegación marítima y posteriormente en la navegación aérea, ya que el empleo de las brújulas muchas veces se veía afectado por la proximidad de las partes de acero y de corrientes eléctricas. Estos primeros aparatos no conseguían la precisión necesaria para los trabajos topográficos. Más adelante se fabricaron nuevos modelos: su aplicación iba dirigida a las operaciones topográficas subterráneas, y se consiguieron precisiones de hasta 15", siendo el mayor inconveniente el excesivo peso de éstos (alrededor de los 35 Kg.)

Hoy en día existen en el mercado giróscopos de poco peso (unos 2 Kg.), adaptables como accesorio a los teodolitos. La parte fundamental es un giro-motor alimentado por una batería que hace girar al rotor a una velocidad de 22.000 rpm. El sistema de suspensión es una cinta metálica contenida en la parte superior alargada del aparato, que consigue la horizontalidad del eje del rotor. De esta manera las oscilaciones son alrededor de una posición media que es la del plano meridiano; conviene que la oscilación esté comprendida entre 3° y 6°, lo que se consigue mediante un amortiguador y orientando previamente el teodolito de modo aproximado.



La duración de una semi-oscilación es variable con la latitud, siendo de unos 4 minutos en latitudes medias. Se siguen las oscilaciones a través de un anteojo provisto de un retículo graduado a derecha e izquierda con una marca en el centro en forma de V. Una señal luminosa oscila con el rotor, y permite seguir las oscilaciones con el tomillo del movimiento horizontal del teodolito.





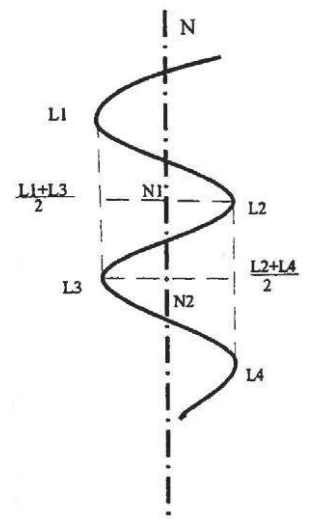
Como operadores efectuaremos una lectura del limbo horizontal en cada elongación máxima, momento en el que el índice permanece un instante parado, pudiendo aforar el centrado de la marca en V. Repetiremos las lecturas en dos oscilaciones completas como mínimo, y como éstas se van amortiguando, obtendremos la posición del norte geográfico calculando la llamada media de Schuler.

$$N = \frac{(N1 + N2)}{2}$$

El tiempo de duración de toda la operación es de unos veinte minutos, y la precisión conseguida aproximadamente de 1°.

Hay que resaltar que la dirección proporcionada por el giróscopo es un acimut verdadero, es decir, la dirección del meridiano; si la cuadrícula que se está utilizando se basa en otra dirección, habrá que aplicar una corrección a los datos obtenidos con el giróscopo.

Para ello estacionaremos el teodolito giroscópico en un vértice de la triangulación exterior y efectuaremos varias observaciones para determinar el norte verdadero, visando a continuación a todos los vértices visibles desde el de estación; obtendremos sus acimutes verdaderos que comparados con los previamente calculados, nos permitirá obtener el valor de la corrección, como promedio de las diferencias obtenidas en





cada vértice observado.

Por otro lado, también es importante destacar que si se van a utilizar teodolitos giroscópicos para iniciar los trabajos subterráneos desde dos pozos que disten entre sí más de un kilómetro en dirección este oeste, habrá que modificar la corrección obtenida para la determinación del norte de la cuadrícula en un pozo, debido a la convergencia de meridianos en el segundo pozo, ya que los meridianos verdaderos convergen hacia el polo, mientras que los de la cuadrícula son paralelos por definición.

La fórmula de la convergencia de meridianos es: $C'' = 32,40 \times L \times \text{tg } \phi$

Donde:

C'' = convergencia en segundos de arco

L = distancia este-oeste en kilómetros

ϕ = latitud del lugar.

Ejemplo: Si la distancia este-oeste entre los dos pozos fuese de 2 Km, y la latitud del lugar de $41^\circ 20'$, la convergencia de meridianos sería de $57''$. Luego si la corrección a efectuar en el acimut verdadero era de $10^\circ 28'30''$ en el pozo situado más al este, en el situado al oeste será de $10^\circ 27'33''$.

Otra opción sería repetir el mismo proceso realizado en el exterior del primer pozo.

Conjuto de giroteodolito puesto en estación. El elemento central es un giróscopo Gyromat 2000 al que se le ha adaptado, en su parte superior, una estación total robotizada Leica TCA2003, que es la que ofrece la lectura angular del acimut determinado por el giróscopo. El conjunto va montado sobre una bancada que posibilita su puesta en estación sobre el pilar de observación.



3.1.3. Comunicación por dos o más pozos:

Si se dispone de varios pozos se determina en el fondo de cada uno de ellos la vertical de un punto exterior de coordenadas conocidas. Se inicia la poligonal interior desde uno de estos puntos con una orientación arbitraria y se cierra en el otro.

Con esta desorientación desconocida llegamos a calcular unas nuevas coordenadas del punto de cierre, con las que deducimos el "falso acimut" entre estos dos puntos extremos. Si lo comparamos con el acimut verdadero obtendremos la desorientación del itinerario.

Hay que hacer notar que, generalmente, los pozos están alejados entre sí varios centenares de metros e incluso kilómetros, por lo que un error de centímetros en la situación de cualquiera de los puntos de salida del itinerario interior es compatible con la precisión necesaria para los trabajos de interior.



3.2. Transmisión de la altimetría:

Al igual que en la transmisión de la planimetría, el enlace de la red altimétrica exterior con el interior tendrá más o menos dificultad dependiendo de qué tipo de comunicación se trate. Por ello se planteará el caso de que la comunicación sea directa (boquillas del túnel, rampas, escaleras) o sea a través de pozos.

También la precisión nos hará escoger un método u otro de los que a continuación se describirán: no será lo mismo transmitir la altimetría a un túnel de ciudad, por ejemplo de Metro, que al interior de una mina. En una mina un error de algunos centímetros en la transmisión de la cota no tiene mayor importancia, aunque una vez en el interior sí hay que haya que esmerarse en la prolongación de los itinerarios altimétricos, sobre todo para el estudio de los desagües y transportes. En un túnel de ciudad es especialmente importante la situación altimétrica de los servicios existentes (alcantarillado, gas, líneas eléctricas), datos tomados desde el exterior, y el túnel.

Por último hay que decir que hay ocasiones en las que se trabajará con cotas negativas, por ejemplo en túneles de ciudades próximas al mar. Este inconveniente que puede provocar errores groseros, algunos topógrafos lo solucionan elevando el plano de comparación, de manera que todas las cotas, tanto exteriores como interiores, sean positivas.

3.2.1. Comunicación directa

Partiendo del punto de la red altimétrica exterior que habíamos situado próximo a la zona de enlace con el interior, prolongaremos la nivelación geométrica. Esta prolongación tendrá menos tramos si la comunicación se realiza por las boquillas de un túnel, y muchos más si es por las escaleras de enlace con un túnel de Metro, pero no ofrece mayores dificultades. Se deberá hacer itinerario de ida y de vuelta para comprobar el cierre.

En el caso de minas en las que la comunicación sea a través de rampas, tal vez se puedan utilizar las cotas trigonométricas obtenidas en la prolongación del itinerario planimétrico exterior al interior, pero en general el nivel suele ser el aparato utilizado en la transmisión de la altimetría.

3.2.2 .Comunicación por pozos:

La transmisión altimétrica consistirá, en esencia, en la medida de la profundidad del pozo. Sea cual sea el método utilizado habrá que enlazar el punto situado en la boca del pozo con uno próximo de la red altimétrica exterior y dejar perfectamente señalado el del fondo, que será el de partida para el itinerario altimétrico interior. Generalmente se utilizará el nivel en dicho enlace.

A continuación se describirán los métodos más utilizados en la medida de profundidad de los pozos:

a) Medición con cinta.

Si el pozo no es muy profundo se puede realizar una medición directa por tramos con la cinta metálica que usamos para otros trabajos topográficos, apoyándonos en puntos marcados en la propia entibación o revestimiento del pozo y, mejor aún, en los carriles



de la jaula de extracción en el caso de minas. Para efectuar la medición de los distintos tramos un operador se sitúa en el techo de la jaula y el otro en un asiento que se ha fijado al cable de descenso de la jaula, unos 20 metros más arriba. El método es incómodo y el número de mediciones alto. Todo ello afecta a la precisión, por lo que no se recomienda para pozos profundos, aunque tiene la ventaja de no necesitar instrumental específico.

Para evitar la medición por tramos existen en el mercado cintas metálicas graduadas de hasta 1.000 m de longitud de las que pende una plomada tensora de unos 20 Kg. de peso. La cinta va enrollada en una gran polea que dispone de freno para controlar el descenso. Otra polea más pequeña situada en la boca del pozo guiará la bajada de la cinta.

El método es lento, ya que hay que esperar a que cesen las oscilaciones; para conseguirlo se opera de la misma forma que con las plomadas de gravedad.

Estas cintas se pueden utilizar también como plomadas de gravedad, en cuyo caso la medida de la profundidad y la transmisión de la planimetría se realizan al unísono.

También se podrían transmitir la planimetría y la altimetría en la misma operación de la manera inversa a la anteriormente comentada, es decir, haciendo dos señales en el hilo de la plomada, una a la altura de la boca del pozo y otra podría ser la parte superior de la propia plomada; una vez acabadas todas las observaciones se debe recoger el hilo y extenderlo en la superficie, en una zona sensiblemente horizontal, para medir con una cinta la longitud entre las señales.

Sea la cinta metálica o el hilo de la plomada lo que hemos utilizado para medir la profundidad del pozo. Hay que efectuar una corrección en la longitud medida, debido al alargamiento que sufre el hilo o la cinta sometidos a la tensión de su propio peso, más el de la plomada. Esta corrección será siempre de signo positivo (aditiva).

Cálculo de la corrección de la longitud medida:

Una cinta o hilo metálico sometidos a una tensión uniforme experimentan un alargamiento que será directamente proporcional a un coeficiente “K”, que depende de la naturaleza del metal, a la tensión “p”, a la que está sometido el hilo o cinta, y a su longitud “L”, y será inversamente proporcional a la sección “S”. Por tanto vendrá dado por la fórmula:

$$\Delta L = \frac{K \times p \times l}{S}$$

En nuestro caso, al estar la cinta vertical, la tensión no es uniforme ya que además de sostener el peso de la plomada sostiene el peso de la propia cinta que va siendo mayor cuanto más cerca de la superficie se encuentra.

Por lo tanto esta fórmula sólo es aplicable a un segmento de cinta o hilo tan pequeño como nos podamos imaginar, de manera que no influya la variación del peso.

Para deducir la fórmula general que se pueda aplicar a la totalidad de la longitud' medida L, imaginaremos la cinta, antes de alargarse, dividida en “n” segmentos iguales y tan pequeños como antes hemos descrito, de longitud “L” y peso “p”. Si llamamos



“P1”, al peso de la plomada, el final del primer segmento sostendrá el peso “P1”, mas su propio peso “p”; el final del segundo segmento sostendrá [P1 + 2p] y de esta manera el último [P1 + np].

Si aplicamos la fórmula inicial a cada uno de estos segmentos, el alargamiento total será la suma de los alargamientos elementales, es decir:

$$\Delta L = \frac{K \times l}{S} \times [(P1 + p) + (P1 + 2p) + \dots + (P1 + np)]$$

La expresión entre paréntesis es la suma de los elementos de una progresión aritmética de razón “p”; por lo tanto es igual a la semisuma de los elementos extremos por el número de términos. Como “p” es tan pequeño como queramos su límite es cero, por tanto despreciable; si llamamos PZ al peso total de la cinta que pende del pozo, es decir a np, y L a la longitud total de la cinta, es decir a nL, tendremos como expresión final del alargamiento

$$\Delta L = \frac{K \times l}{S} \times [(P1 + P2/2)]$$

Como ejemplo ilustrativo se calcularán los distintos alargamientos para profundidades comprendidas entre 100 y 500 m utilizando en la medida de la profundidad una cinta de sección 13 mm. de ancho por 0,4 de espesor, con un coeficiente K de 1/10.000 aproximadamente el del acero (consideraremos como densidad media del acero 7,8). Con estos datos el peso del mm. de cinta será:

$$p = 0,01 \times 0,13 \times 0,004 \times 7,8 = 4,056 \times 10^{-8} \text{ Kg.}$$

Si se utiliza una plomada de 15 Kg. de peso, las correcciones a efectuar son las siguientes:

"L" medida (m)	P ₂ (Kg.)	ΔL (mm.)	L Corregida (m)
100	4,056	33	100,033
200	8,112	73	200,073
300	12,168	122	300,122
400	16,224	178	400,178
500	20,28	242	500,242

La corrección obtenida por cálculo nunca será exacta, ya que, como se deduce, depende del, coeficiente K de elasticidad, dato que da el fabricante y que nunca podrá ser homogéneo en una cinta de tanta longitud; además dicho coeficiente varía con el tiempo y la frecuencia de utilización, y no es fácil de realizar una comprobación experimental.

b) Método de Firminy

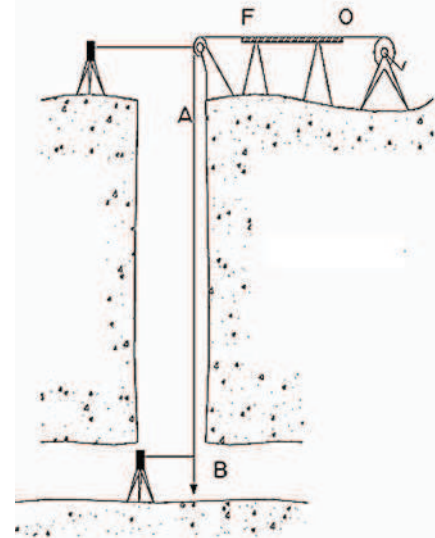
Un método más preciso es el ideado en la población de Firminy (Francia). Consiste en medir el hilo ya estirado. Con él se consiguen precisiones de 1:20.000, es decir, de 5 mm cada 100 m.

Se usará un hilo de acero, o mejor aún de invar de 1,5 mm de diámetro enrollado en un tomo como los que ya se han descrito; se situará una polea en la boca del pozo y se hará pasar por ella el hilo. Entre la polea y el tomo debe quedar espacio suficiente para



situar una regla, de 5 m de longitud las más usadas. La regla se habrá montado sobre una bancada y se podrá deslizar por ella midiendo el desplazamiento.

La forma de operar será la siguiente. se coloca la plomada que pende del hilo a la altura del punto inicial A, situado en la boca del pozo y cuya altitud ya es conocida; en este momento se marca el hilo con una pinza en su enrase con el origen de la regla (O); se acciona el tomo hasta que la pinza se sitúe exactamente en el final de la regla (F) (en ese momento el hilo habrá descendido 5 m exactos); pero el enrase con F es difícil de aforar con el tomo, por lo que se desplazará la regla hasta conseguir la perfecta coincidencia de la pinza con el extremo de la regla F (por lo tanto, los 5 m habrá que corregirlos en este desplazamiento).

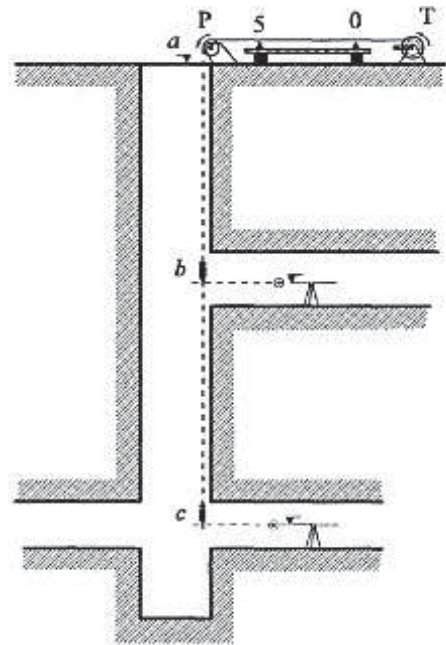


Se sitúa una nueva pinza en O y se vuelve a accionar el tomo. El hilo habrá descendido de nuevo 5 m más menos el nuevo desplazamiento de la regla para conseguir el enrase con la pinza. Repitiendo el proceso llegaremos a las proximidades del punto B, punto al que queremos transmitir cota. Ese pequeño tramo se medirá manualmente o bien con un nivel.

Pero la suma algebraica de los desplazamientos de la regla será igual a la posición foral de ésta con respecto a la inicial, único desplazamiento a medir.

Por tanto la profundidad de A, a B será tantas veces 5 m como tramos hayamos medido, más el desplazamiento foral de la regla, más el último tramo medido directamente.

Se comprende que todas estas operaciones habrá que realizarlas con la máxima meticulosidad si se quiere conseguir la precisión mencionada de 1:20.000.



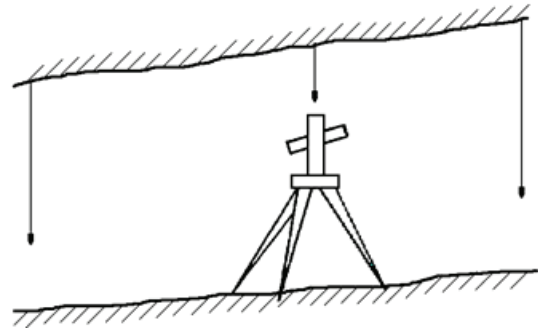
c) Con Estaciones Totales.

Es el método más preciso y cómodo. Por ello situaremos el aparato en el fondo del pozo y, bien con la ayuda de un ocular acodado para la observación de visuales al cenit, o de un ocular para visuales inclinadas, mediremos la distancia y el ángulo vertical al punto del fondo del pozo al que queremos transmitir cota y al punto de la boca del pozo de cota conocida.

No es preciso hacer notar que si la precisión angular del aparato es la necesaria se podría realizar al unísono la transmisión de la planimetría (orientación y coordenadas XY).

Donde $e + ed < 1.5 \text{ mm}$.

Es decir, que el eje del aparato y de la señal no podrán separarse de su verdadera situación más de milímetro y medio, entre ambos, si queremos que el error de dirección no impida obtener la precisión para la que está construido el aparato



4.1.2 Instrumentos:

Antiguamente se distinguían los teodolitos empleados en el interior de la mina de los usados en el exterior por su pequeño tamaño y porque los limbos iban protegidos del polvo y de la humedad.

Hoy en día los teodolitos que hay en el mercado sirven igual para el interior que para el exterior por ser blindados y protegidos con pinturas especiales a base de siliconas para evitar la corrosión. Además, están dispuestos para que se les incorpore el equipo de iluminación de retículo y limbos.



La apreciación angular debe ser por al menos del medio minuto centesimal si se trata de un levantamiento para toma de avances en minería o similar; tampoco es necesario que sea superior, dado el error de dirección que ha de cometerse. Pero para trabajos subterráneos de precisión, como levantamientos de comprobación y para el control de las deformaciones, el teodolito de 1 seg. resulta el más apropiado.

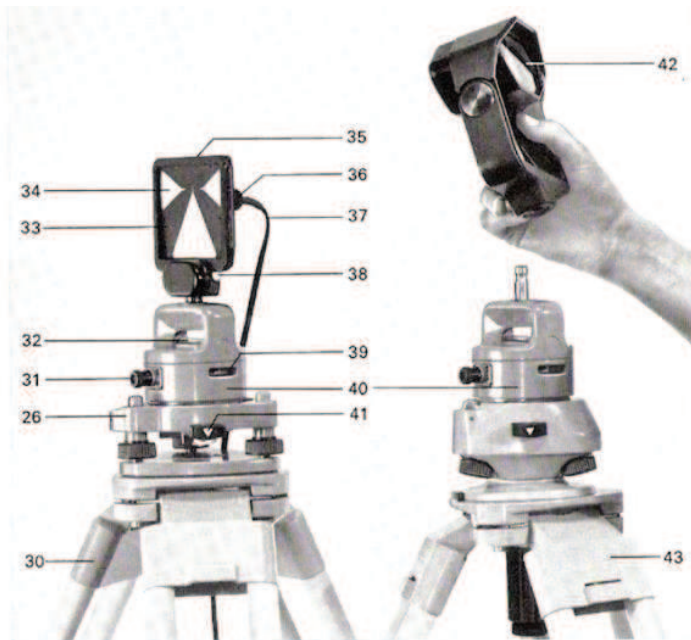
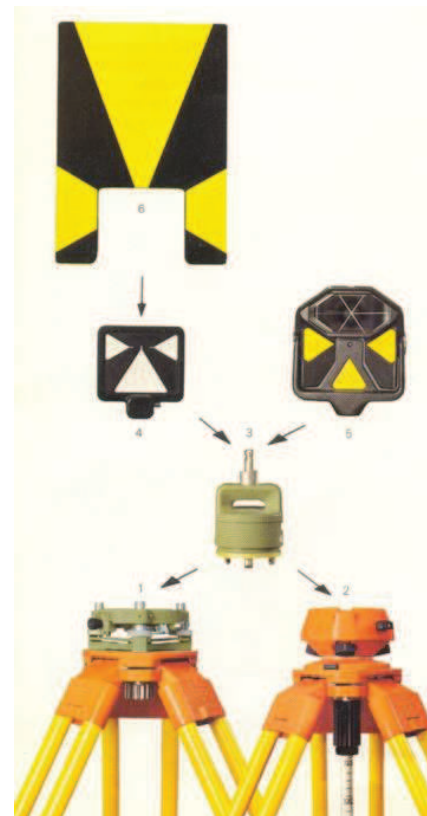


Fig. 16 Portador con señal de puntería y reflector de prisma o bien juego para el centrado con precisión

- | | |
|-----------------------------|--|
| 26 Base nivelante GDF10 | 37 Cable para batería |
| 30 Tripode GST20 | 38 Cerradura de resorte |
| 31 Plomada óptica | 39 Tornillo para el ajuste del 32 |
| 32 Nivel tubular | 40 Portador GZR1 |
| 33 Señal de puntería GZT1 | 41 Botón aliforme con tornillo de fijación |
| 34 Signo para altimetría | 42 Reflector de un prisma GDR31 |
| 35 Marca de centrado | 43 Tripode de centrado GST70 |
| 36 Reflector de iluminación | |





Para anular el error de dirección los equipos de poligonación consisten en un juego compuesto de un teodolito, tres trípodes y dos señales que se fijan al trípode por la plataforma con tornillos nivelantes. Las señales son translúcidas y también llevan incorporadas equipos de iluminación

Para medir el ángulo se estaciona el teodolito en un vértice y las señales en los vértices extremos. Terminada la operación de medir el ángulo se quita el trípode de atrás con su señal y se sitúa en un nuevo vértice. Se permuta la otra señal con el teodolito, sin mover los trípodes y bases nivelantes de ambos (posición análoga a la de empezar la operación). Reflector con iluminación atornillable, fijación sobre la señal de puntería GZT1.



4.1.3. Estacionamientos singulares:

La única diferencia con el exterior a la hora de poner en estación el teodolito es que el eje general de éste se centra por arriba, ya que generalmente la señal se habrá materializado en el techo.

Cuando se centra el teodolito/E.T. debajo de una plomada suspendida del techo el anteojo debe tener una marca de centro en la parte superior. Cuando se usa esa marca el centrado del instrumento será correcto sólo si el aparato está bien nivelado y el anteojo horizontal, en esta posición, girando la alidada alrededor del eje principal la plomada debe permanecer sobre la marca. Aplicando esta regla es fácil materializar la señal si no la llevase. No obstante existe el visor cenital, accesorio del teodolito, que montado sobre el anteojo actúa como una plomada óptica dirigida hacia el cenit.

Sin embargo, cuando el levantamiento requiere mayor precisión, son recomendables las plomadas ópticas cenit-nadir colocadas en el mismo trípode y base nivelante que ha de sustentar el aparato o las tablillas del equipo de poligonación.



No siempre podrán utilizarse trípodes, debido principalmente a que muchas veces impedirían el tránsito de vagonetas y maquinaria, quedando interrumpidos los trabajos de excavación o de extracción.



En estos casos los taquímetros o teodolitos suspendidos de un brazo que ha de clavarse en la pared. El equipo consta de brazos normales de suspensión y de dos señales plomada que se sitúan en el brazo anterior y en el siguiente al que soporta el taquímetro, el hilo de la plomada queda situado exactamente en la posición que ocupaba o que ha de ocupar, respectivamente el eje vertical del instrumento, con lo que se anula el error de dirección del mismo modo que con el equipo de poligonación.

A veces es ventajoso construir una plataforma elevada para colocar el aparato en una posición semipermanente sobre el tráfico, o construir un pequeño pilar de hormigón a un lado del túnel, cuándo se prevé una duración de varias jornadas de las labores topográficas (solución más aplicada en el caso de replanteos). También existen trípodes colgantes utilizados en circunstancias especiales.

4.1.4. Métodos.

Como en todo itinerario se reducen los métodos a la medida de los ángulos y de los ejes. Respecto a la medida de los ángulos, las lecturas acimutales conviene hacerlas con el instrumento orientado como en cualquier itinerario, con la ventaja de poder conocer el error de cierre inmediatamente en un itinerario cerrado.

Para la medida de los ejes en general se utilizan métodos directos, con cinta si los tramos son de corta longitud, o con distanciómetros de mayor o menor precisión según las necesidades. Siempre que sea posible el itinerario tiene que ir encuadrado entre dos puntos de apoyo. En el caso de existir una sola comunicación con el exterior, el itinerario debe ser cerrado.

En estos itinerarios de ida y vuelta, será aconsejable que en el regreso se utilicen distintas estaciones que en la ida. Debido a la dificultad que esto supone, aunque nunca sea recomendable, entra en lo posible estacionar en los mismos puntos a la ida y a la vuelta: aún sería peor el efectuar simultáneamente el itinerario de ida y de regreso midiendo dos veces consecutivas los ángulos y las distancias; pero lo que nunca será admisible es dejar el itinerario colgado sin ningún cierre.

4.1.5. Itinerarios secundarios

En el caso de ramificaciones de las galerías será preciso recurrir a los itinerarios secundarios, que se apoyarán en los puntos poligonómicos de los itinerarios principales.

Para el levantamiento de estas redes podrán utilizarse los mismos aparatos que se usaron en el itinerario principal. Sin embargo en minería, en las estrechas ramificaciones de galerías, son más usuales las brújulas ligeras suspendidas de un hilo denominadas brújulas de minero.





Para su empleo es preciso materializar el itinerario por medio de un hilo tenso que pase por el orificio de las señales clavadas en la pared, de este modo cada tramo del hilo representa un eje del itinerario.

La brújula va montada sobre un sistema cardan que garantiza su horizontalidad. Colgándola en el centro de cada tramo obtendremos su rumbo y, corregido de la declinación nos dará el acimut. Es conveniente que la última alineación del itinerario principal sea la primera de la brújula colgada, ya que la repetición de la medida angular nos sirve para declinar la brújula.

Puesto que las brújulas suelen estar divididas en medios grados, obtendremos el cuarto de grado de apreciación si tomamos la media de las lecturas leídas con los dos extremos de la aguja imantada.

La medida de los ejes se efectuará con cinta metálica, y hallaremos la distancia entre los hilos de las plomadas, utilizando el método de resaltos horizontales o banqueo: se materializarán los tramos con plomadas suspendidas de los clavos, se tenderá la cinta entre los hilos de éstas y se percibirá la horizontalidad por obtener, en esta posición, la lectura mínima.

El itinerario así levantado equivale al que conocemos con el nombre de estaciones alternas, puesto que el rumbo de cada eje lo determinamos una sola vez, por eso es inexcusable repetir el itinerario en sentido inverso.

Una buena norma para trabajar es obtener dos veces el rumbo de cada eje, tanto en el itinerario de ida como en el de vuelta. Para ello colocaremos la brújula en los dos extremos de la cuerda, de este modo, no sólo tendremos mayor precisión hallando el promedio de los dos rumbos, sino que localizaremos cualquier perturbación magnética que pudiera existir.

Como ya indicamos anteriormente, aunque las brújulas son de uso rápido y cómodo, no siempre son utilizables debido a las perturbaciones magnéticas que pueden sufrir no sólo por los materiales magnéticos que suelen abundar en las minas, sino por los carriles, las vagonetas, las herramientas metálicas, etc.

Estudios realizados sobre la influencia de los railes en la brújula permiten llegar a la conclusión de que la acción sobre la brújula de un rail continuo situado a más de 4 m es prácticamente despreciable.

4.1.6. Levantamiento de los detalles

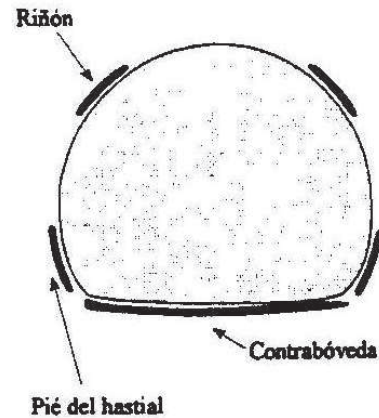
El fin de todos los trabajos topográficos que llevamos descritos, no es otro que el de servir de apoyo al levantamiento de los detalles que constituyen el verdadero plano.

Se distinguirán las necesidades en el levantamiento de los detalles en dos campos, a los que nos estamos refiriendo a lo largo de este capítulo: la obra civil y la minería.

En obra civil: Las necesidades dependerán del tipo de obra o de control a realizar. Si lo que se pretende es encajar una vía o el paquete de firme de una carretera en un túnel ya construido, los detalles que interesarán serán los que aseguren el gálibo suficiente para los vehículos que han de circular.



Para ello se tomarán las partes más críticas de la sección, y que normalmente para el encaje en planta será la zona de los riñones y del pie de los hastiales, así como la contrabóveda para adaptar la rasante. También se tomarán los puntos de inflexión de las paredes. La toma de estos puntos generalmente se realizará con estaciones totales, y en ocasiones teodolito más cinta.



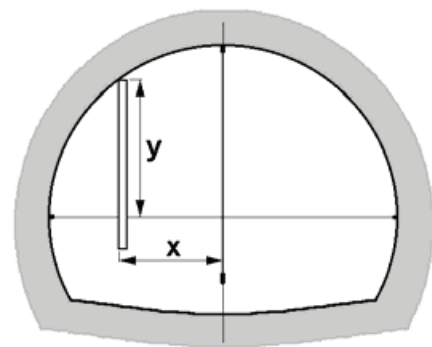
En el primer caso se deberá tener en cuenta el espesor de la carcasa del prisma así como la situación del eje de la señal de puntería, variable según su posición con respecto al eje del aparato. Es adecuado tomar primeramente los datos angulares, visando a una señal apropiada situada en la pared del túnel, para posteriormente medir la distancia al prisma, e incrementar en su caso la magnitud del espesor de la carcasa.

En minería: Los detalles más importantes son las galerías, cuyo ancho deberá quedar reflejado, para lo que será preciso tomar todos los puntos de inflexión de sus paredes, así como todos los puntos que convenga que aparezcan en el plano tales como hitos, instalaciones, carriles, etc.

Dada la escasa distancia de todos estos puntos a los vértices, o a los ejes de los itinerarios, se utilizan para su levantamiento métodos de agrimensura, principalmente el de mediciones y el de abcisas y ordenadas, empleando la cinta metálica.

Por el método de mediciones bastará obtener la distancia del punto que queremos levantar a dos vértices del itinerario, aunque siempre convendrá tomar datos supletorios de comprobación, tales como medir una tercera distancia a otro vértice o a otro punto de detalle. Con el método de abcisas y ordenadas tomaremos como eje de abcisas el eje del itinerario.

Esta parte del trabajo convendrá hacerla simultáneamente con los itinerarios para utilizar las alineaciones que se vayan haciendo de los ejes con hilos, u otros medios, conforme hemos indicado.



También convendrá ir tomando simultáneamente, con metros de mano, la altura de las galerías en los diferentes puntos.

4.2. Altimetría

4.2.1. Geométrica

Cualquiera que sea la naturaleza de los trabajos subterráneos requieren una nivelación de precisión para dar a las rasantes las pendientes proyectadas, incluso en las minas, tanto para el estudio de los desagües como el de los transportes: muchas veces las vagonetas cargadas se deslizan por su propio peso desde los lugares de carga hasta los pozos de salida, utilizando la tracción para el regreso (a esta pendiente se le suele llamar pendiente de igual resistencia).



Lo anteriormente expuesto nos exige efectuar una nivelación por alturas utilizando niveles de línea o automáticos.

Las miras suelen ser de 2 m, en vez de los 4 m utilizados en el exterior. También se emplean miras extensibles. Hay miras reflexivas que se iluminan fácilmente debido a un barniz reflectante que las recubre, y que hace que se perciban sus divisiones con una claridad muy superior a las miras ordinarias. Otras miras llevan iluminación interior incorporada.

Si los ejes de los itinerarios son cortos, pueden iluminarse las miras desde el propio nivel que lleva incorporada una linterna eléctrica sobre el anteojo y que concentra los rayos de luz en la zona de mira que se observa.

En el caso de túneles en los que el acceso es directo por ambas bocas, a las que se puede dar cota enlazándolas entre sí por el exterior, bastará con una nivelación de precisión por el interior del túnel encuadrada entre los citados puntos. Pero en el caso en que la cota se transmita a través de pozos, sólo se tomará la de uno de ellos como punto altimétrico fundamental. La cota de las restantes comunicaciones con el exterior no deberá utilizarse para compensar, entre ellas, el itinerario altimétrico, ya que la precisión obtenida en éste es superior a la transmitida desde el exterior.

4.2.2. Trigonométrica

En algunos casos, cuando no se trate de replanteos, podrá bastar con la nivelación por pendientes efectuada con taquímetros simultáneamente a la observación de los itinerarios primarios. En este caso convendrá que las plomadas utilizadas como señales planimétricas estén suspendidas del vértice una distancia igual que la del aparato con respecto del suyo, se eliminará así de la fórmula:

$$\text{desnivel} = t + i - m \quad \text{los términos } i \text{ y } m.$$

También en el levantamiento de los detalles por métodos taquimétricos suele ser suficiente la precisión de la cota obtenida trigonométricamente.

4.2.3. Con eclímetros suspendidos

Son utilizados en igual forma que las brújulas de minero en los itinerarios de relleno propios de la minería; el eclímetro sirve para medir los ángulos verticales y, con la magnitud de la distancia inclinada medida entre los dos vértices, poder obtener la distancia horizontal y el desnivel entre éstos.

El eclímetro lleva, como la brújula colgada, dos pinzas en los extremos de un semicírculo graduado. Colgado del centro de éste lleva una plomada cuyo hilo nos sirve de índice para hacer las lecturas y así obtener la magnitud de los ángulos verticales.

Una vez materializado el eje por medio de un hilo, colgamos en él el eclímetro a un metro de cada uno de sus extremos para hallar la media aritmética de las dos lecturas.

Los eclímetros suelen estar divididos en cuartos de grado, y miden ángulos de inclinación, o sea, que el hilo de la plomada coincide con el cero del eclímetro cuando está suspendido de una cuerda horizontal; por lo tanto, habrá que indicar en cada caso si la alineación es ascendente o descendente.



En los itinerarios de relleno las cotas irán encuadradas, lo mismo que en planimetría, entre los puntos poligonómicos con que enlacen.

5. IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LAS EXPLOTACIONES MINERAS SUBTERRÁNEAS

5.1. Los 33 mineros chilenos

Recordemos el derrumbe de la Mina San José, ubicada a 30 km al noroeste de la ciudad de Copiapó, Chile; que ocurrió el 5 de agosto de 2010, dejando atrapados a 33 mineros a unos 720 metros de profundidad, durante 70 días. Las labores de rescate comenzaron el mismo día en la noche, planificando, asegurando el área, realizando reconocimiento de la mina e ingresando en búsqueda de lugares de acceso. En la madrugada del viernes, grupos de rescatistas empezaron a trabajar para lograr acceder por una chimenea de ventilación.

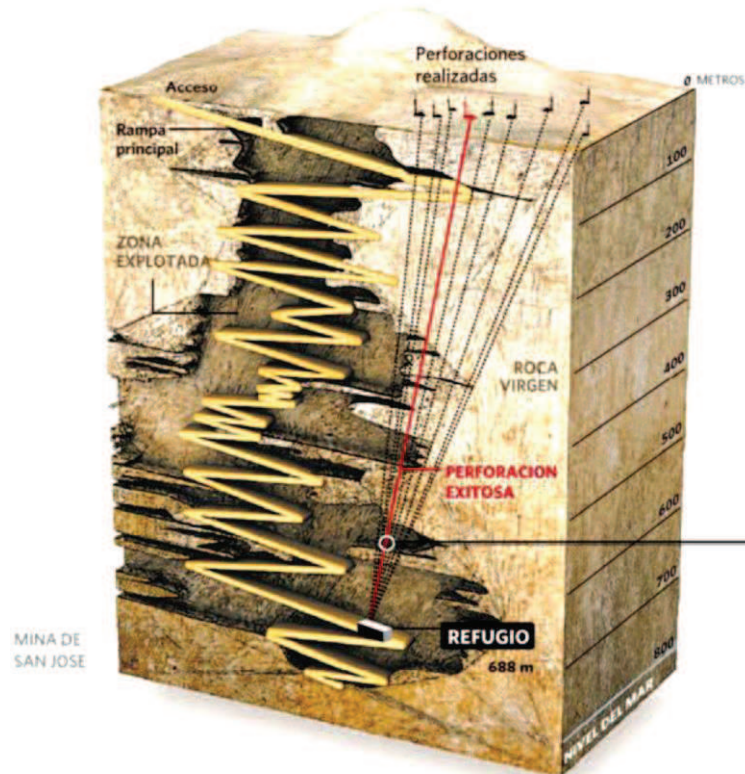
Un nuevo derrumbe se produjo en la tarde del sábado 7 de agosto, necesitando entonces maquinaria pesada para continuar con las tareas. El domingo 22 de agosto, 17 días después, los mineros fueron encontrados con vida, después de realizar nueve perforaciones en forma interrumpidas, durante 33 días.

Una de las preguntas que debemos realizarnos los agrimensores, si se tenía buena topografía de la mina: ¿se hubiese errado en la ubicación del refugio con las ocho primeras perforaciones?

Toda la operación de rescate tuvo un costo aproximado de entre los U\$S 10-20 millones. Hasta la fecha es el mayor y más exitoso rescate de la minería mundial, siendo el evento con mayor cobertura mediática de esas características con alrededor de 1.000 a 1.300 millones de telespectadores.

En los trabajos topográficos subterráneos se hace necesario reducir las posibilidades de cometer errores. Dado que se trabaja con poligonales orientadas, sin ningún contralor.

Además, se debe tener en cuenta el acomodamiento de las rocas, cuando se extrae el material. Se debe comenzar con las nuevas mediciones a partir de vértices estables geológicamente.



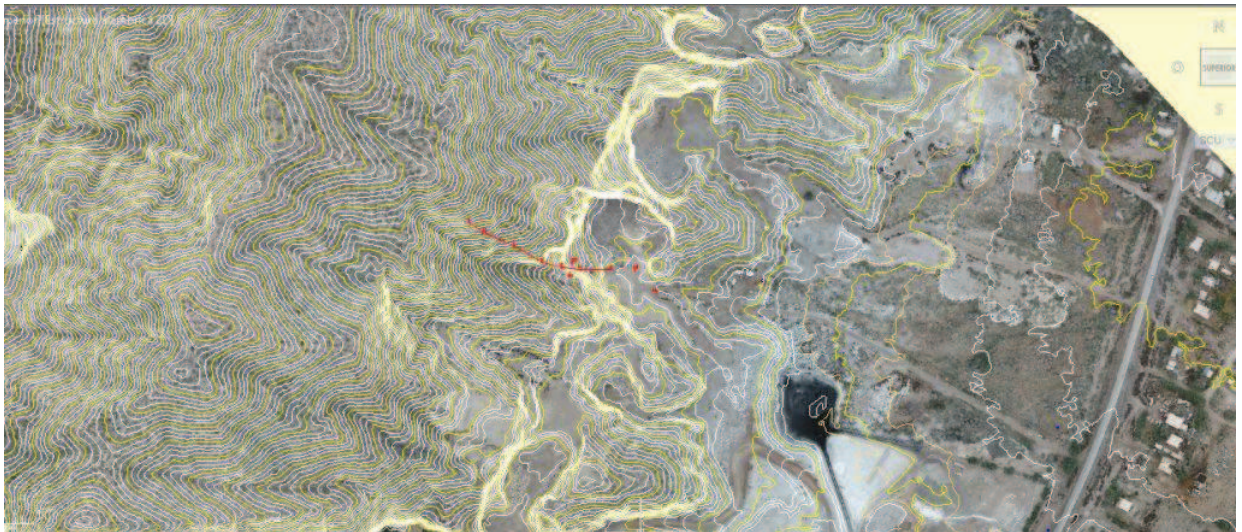


5.2. Estudio Topográfico Geológico Preliminar de un Yacimiento

Con el fin tratar de evaluar la existencia y cuantificación del mineral de interés a nivel del túnel de explotación actual, hasta el límite Oeste del predio de 10,8 Ha. Este estudio es solo una estimación de recursos de mineral basada en visualización de datos de túnel y fotografía aérea muy exacta, ya que se carece de relevamiento de contacto de superficie y de sondeos con diamantina u otros.

El relevamiento topográfico y confección de planos fueron realizados por Topcant Asistencia Técnica SRL integrado por Agrim. Carlos Melitón e Ing. Civil Daniel Moris.

La topografía externa superficial fue realizada con una Unidad Autónoma de Vuelo (UAV) o “drone” es decir, un avión no tripulado con piloto automático, inteligencia artificial incorporada, GPS, liviano y de pequeñas dimensiones. Obtención de fotos digitales georeferenciadas con técnica fotogramétrica y cámara digital de 16 MPixels de alta resolución. Los datos capturados en el vuelo se descargaron con un programa, y las imágenes capturadas se procesaron de forma totalmente automática logrando una solución de cartografía completa: creando el ortomosaicos en 2D de alta calidad georeferenciados. En Cad se trazaron líneas de nivel con una equidistancia de 2,50 m para las curvas secundarias, y 10 m para las curvas primarias, más que suficiente para la topografía abrupta existente.



Para la medición del Túnel de Explotación se usaron dos Estaciones Totales, mediante Rayos Laser, para el relevamiento del contorno completo del mismo, es decir, pisos, techos, hastiales (paredes Norte y Sur), perfiles seccionales, a distancias aleatorias, uniendo las mismas por medio de una Poligonal longitudinal abierta desde la boca del Túnel hasta su terminación Oeste.





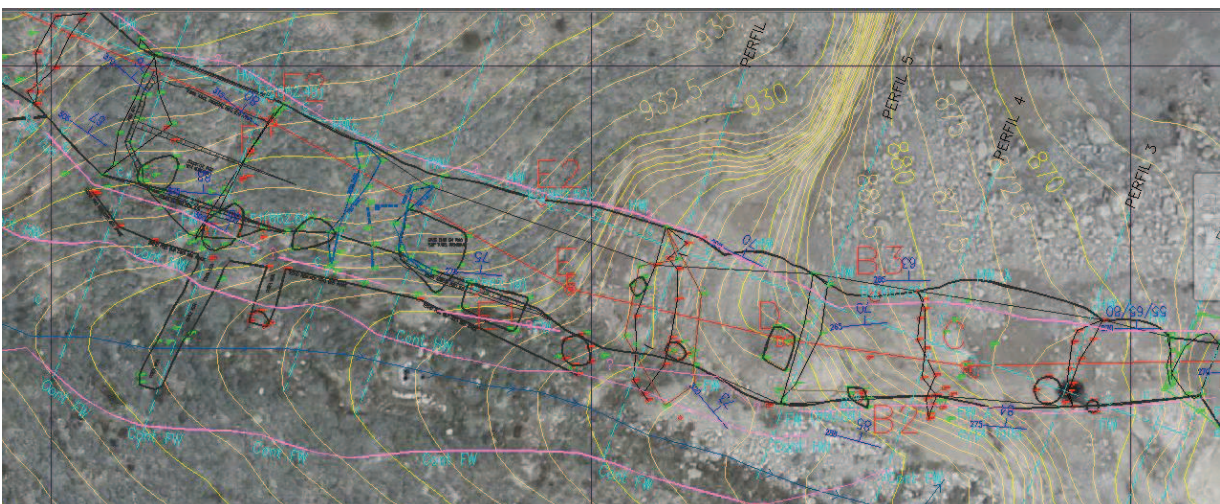
El piso superior del Túnel de Explotación no pudo ser medido en todo su ámbito, debido a la falta de accesos con seguridad al mismo, que consta solo de rampas precarias sobre el hastial Sur de unos pocos decímetros de ancho. Esto afecta directamente al tránsito con instrumental.

Sin embargo se tomaron la mayor cantidad de puntos posibles del piso superior, y de su techo en algunas partes, cuando se podía visualizar desde el piso inferior, y a través de las chimeneas. También se tomaron puntos de corta vetas ascendentes sobre el hastial sur del piso superior cuando se podían visualizar.

El plano topográfico-geológico se ha confeccionado a escala 1:1000, adecuado para la interpretación de detalles, y de diseño de explotación futuras, y una amplificación a escala 1:250 del Túnel en sí, para poder visualizar e interpretar con más detalle.

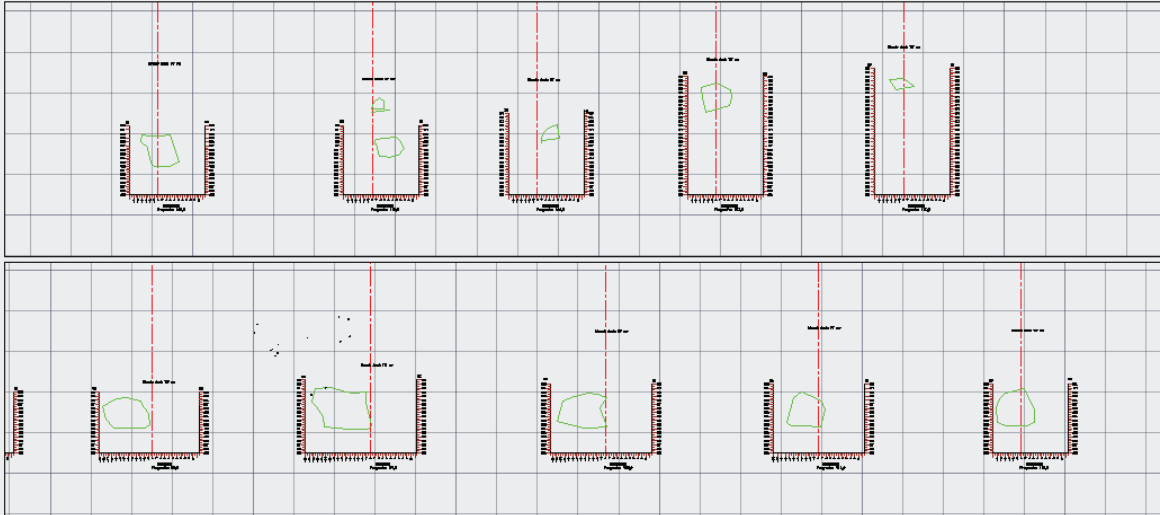


El Relevamiento Geológico Interior Túnel se realizó basado en la topografía relevada del túnel, tomando los Rumbos y Buzamientos mediante Brújula Geológica





Brunton, que nos da el Azimut y la inclinación de los hastiales que contienen la veta del mineral, como así también los contactos, cuando se podían observar. Esto nos da la idea generalizada de la deformación general de las fallas transversales que contienen las vetas en todo su ancho (gauge), potencia, que va desde los seis/siete metros, hasta los 13, e inclusive de quince metros, pero como promedio es de diez metros.



Con el apoyo del Plano de Planta de Interior Túnel, y lo estimado en superficie, se ha realizado una amplia serie de Secciones Transversales (Perfiles), para así poder calcular los volúmenes y masas del mineral, determinar en forma aproximada la derrota de futuros túneles de explotación.

Para el cómputo de los recursos se ha considerado tres cuerpos de caras desiguales formado de la siguiente manera:

- 1 Un techo de forma regular plana formada por la línea que une los contactos supra yacentes y los infrayacentes
- 2 El piso de las reservas explotables, es un plano ídem al anterior
- 3 Las caras laterales están definidas por los hastiales de los contactos y la roca de caja.

Calculo de volúmenes y masas

Para la determinación de los volúmenes de Recursos se ha realizado una serie de Perfiles Secciones Transversales Topográficos – Geológicos a distancias aleatorias que contengan las vetas del mineral a fin de poder calcular las secciones de la misma y volúmenes. Asimismo se ha dividido estas Secciones en tres de forma vertical, y así separar tres tipos de recursos: 1) Siguiendo la misma metodología de explotación actual hasta el límite Oeste del Predio con 20 metros de altura entre las cotas 857/864 y cota 884; 2) La superior a esta hasta la cota de terreno natural; 3) La inferior a la primera, o sea la actual en explotación, hasta la cota 830.

Los volúmenes de recursos tenido en cuenta son la totalidad de las representadas en cada Sección Transversal, no teniéndose en cuenta los volúmenes que deben dejarse en una explotación para formar pilares y puentes de seguridad, ya que estos se deben calcular posteriormente en el cálculo de diseño minero, pero por lo observado se trata de entre un 15 y 20% de reservas que quedan por seguridad minera.



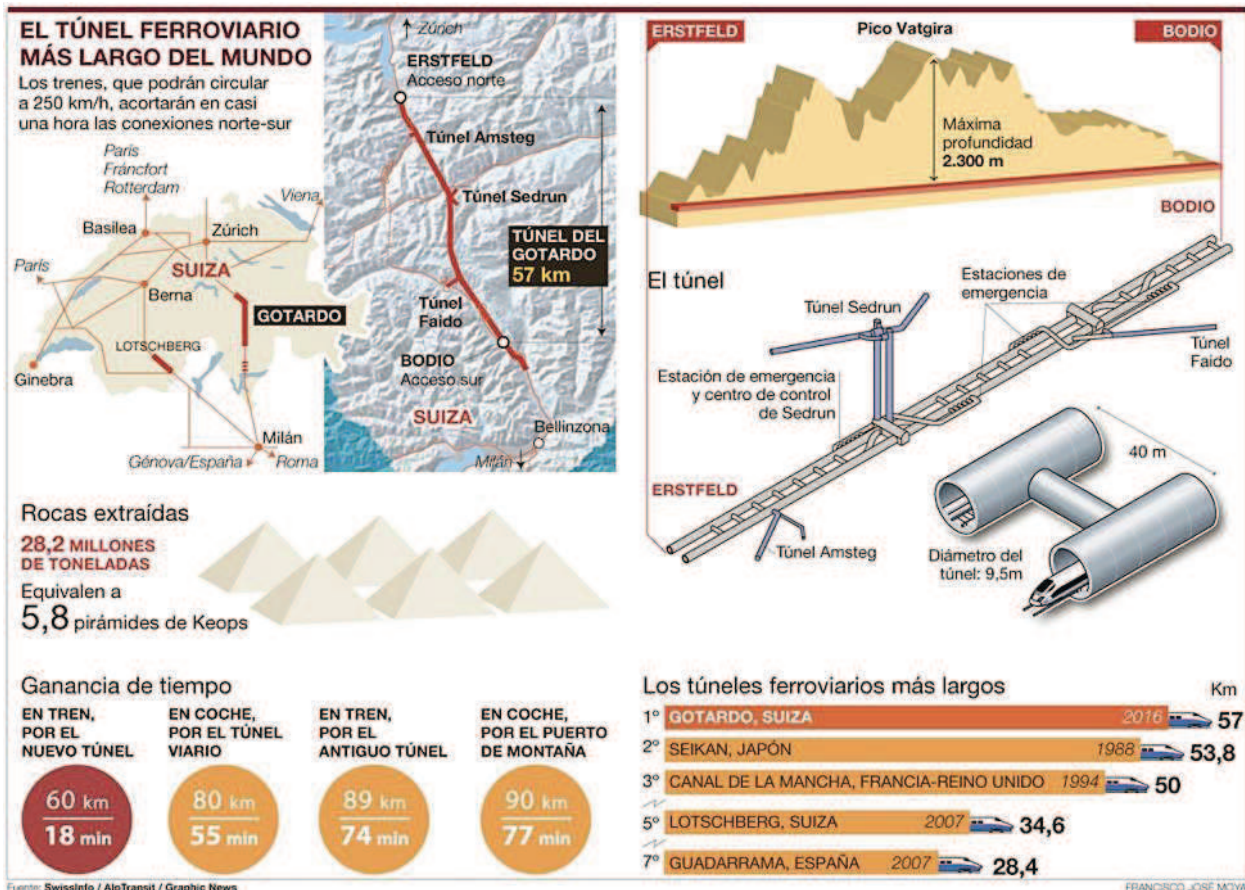
En todos los casos se ha tomado como Limite Este la Boca de Túnel Actual, y no se ha tenido en cuenta los Recursos existentes al Este de este punto, la planchada de la cantera, y toda la topografía descendente hasta la llanura y límite del predio contra la Ruta, ya que es muy difícil determinar cualquier contacto geológico sin estudios más profundos. Para calcular la masa de este volumen se aplica un factor de Peso Específico.

6. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES GEODÉSICAS INTERIORES EN TÚNELES DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD.²

6.1. Introducción del túnel base de San Gotardo.

El túnel de base San Gotardo (o GBT) es un túnel ferroviario que está construido en Suiza, más largo del mundo, Con una longitud de 57,1 km y un total de 153,5 km entre túneles, pozos y galerías. La construcción consiste en de dos túneles separados, en realidad consiste en dos túneles pegados, uno de ida y otro de vuelta. Tiempo de construcción 17 años. Costo u\$s 12.500 millones. Personas empleadas 2600. Longitud de la tunelera 410 m. Concreto utilizado 4 millones de metros cúbicos. Movilización de carga durante la construcción 377 mil toneladas al día, con una vía cada uno. La unión de las dos partes tuvo lugar el 15 de octubre de 2010 en la parte Este, a 30 km de la boca Norte y a 27 km de la boca Sur

Esta maravilla de la ingeniería permitirá unir más rápida y eficientemente el sur y el Norte de Europa, una comunicación que siempre se ha visto dificultada por las escarpadas y casi infranqueables montañas de los Alpes.



² Velasco, J., Herrero, T., Molina, I., López, J., Pérez-Martín, E., Prieto, J. (2015). Informes de la Construcción, 36



La idea del proyecto es agilizar el tránsito de mercancías y personas, y reducir la contaminación causada por el tráfico de vehículos que circulan por rutas aledañas.

Las autoridades suizas calculan que 260 trenes de carga podrán pasar por el túnel cada día y que 20 millones de pasajeros se beneficiarán de esta nueva vía.

El trayecto entre Zúrich y Milán, por ejemplo, se reducirá a 2 horas y 50 minutos, casi una hora menos que en la actualidad.

El túnel de base de San Gotardo va desde el municipio de Bodio (en el sur de Suiza) hasta la comuna de Erstfeld (en el centro del país). Si no tuvieran refrigeración, estos socavones serían un horno, ya que fácilmente podrían alcanzar los 50° centígrados.

Tanta fue la cantidad de roca y escombros que debieron ser removidos -más de 28 millones de toneladas- que en el valle donde se encuentra una de las bocas del túnel "nacieron" varias montañas de material.

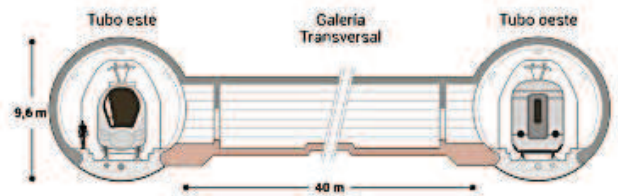
La roca es dura y estable, se trabaja

con tuneladoras (TBM – Tunnel Boring Machines), controladas por computadores, abren paso cortando la roca, aseguran las secciones recién excavadas y remueven el material. Tienen más de 400 metros de largo, pesan más de 3.000 toneladas y pueden avanzar hasta 40 metros al día.

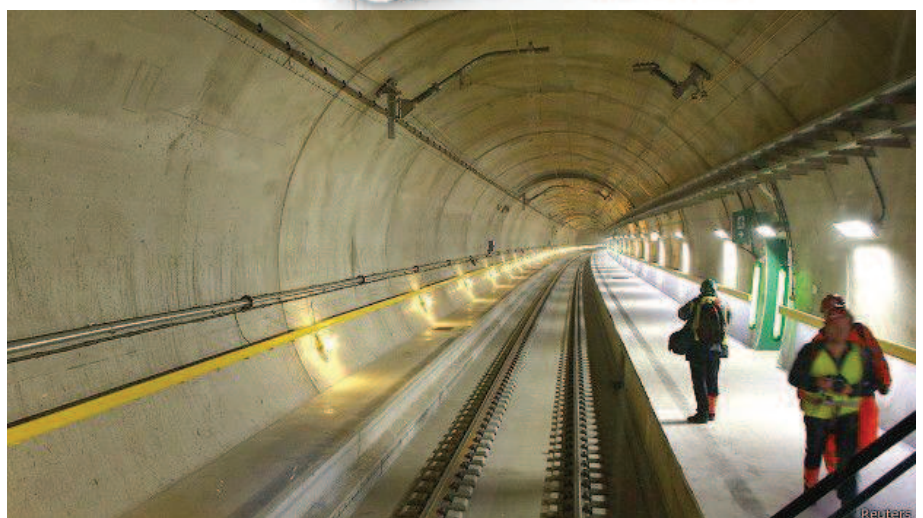
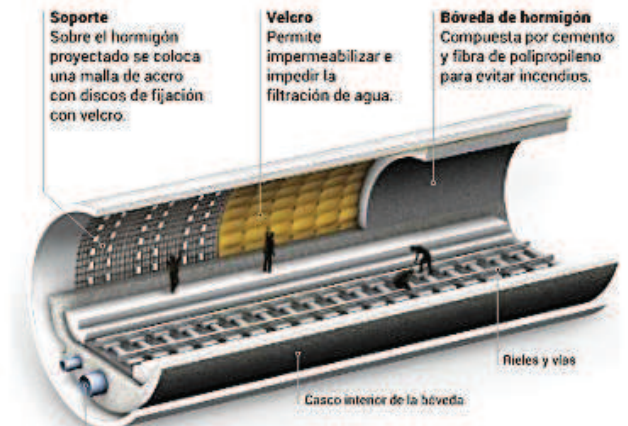


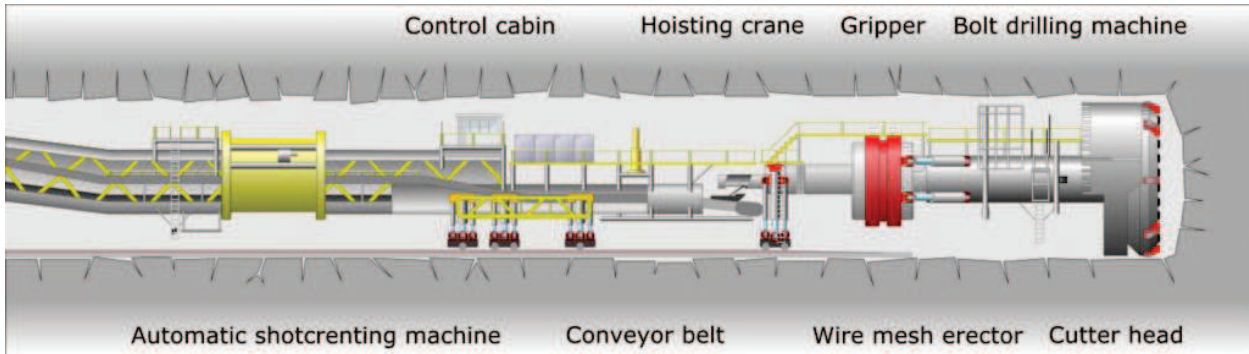
El túnel

Consta de dos tubos de vía única conectados entre sí cada 300 m por galerías transversales. Sirven para evacuar a los pasajeros en caso de emergencia.



Revestimiento del túnel





6.2. Diseño de redes geodésicas interiores

El guiado de las Tuneladoras durante su avance, deben apoyarse en los puntos determinados inmediatamente detrás de ellas. Conseguir las precisiones requeridas presentaría algunas dificultades en condiciones normales con respecto al exterior, pero en el interior de un túnel se plantean ciertos factores que ensombrecen el panorama. El más importante y difícil de tratar es el de la **refracción lateral**.

El diseño de redes interiores es uno de los principales problemas, desde el punto de vista geodésico y topográfico, el cual tiene unas características tales que todos los textos de topografía de precisión aconsejan evitar.



Con estas redes se va guiando la tuneladora y en ningún momento dicha red vuelve a tener comprobación sobre otros puntos de control. A medida que la red va avanzando, las precisiones obtenidas de sus coordenadas van empeorando de forma exponencial.

Los vértices de las redes interiores de los túneles se han de referir a la infraestructura señalizada en cada boca mediante, al menos, tres hitos, cuya posición es conocida (red exterior), para ello se debe haber un enlace geométrico mediante un itinerario formado por una sucesión de estaciones unidas por ejes geoméricamente definidas a través de sus ángulos y sus distancias, los cuales se pueden clasificar en cerrados o encuadrados. En el caso de los túneles los itinerarios (poligonales), por lo general, suelen ser cerrados, pero en cualquier caso siempre es preciso disponer de una comprobación a partir de los datos de observación.

Podemos en función de la distribución de los vértices de las redes interiores, hacer una división general en:

Poligonal en zig-zag: de ésta forma evitamos las observaciones paralelas a los hastiales y minimizamos el error de refracción lateral.

Poligonales por el eje: Las visuales por el centro del túnel disminuyen el efecto de la refracción lateral, pero llevar una poligonal por el eje es prácticamente imposible.



Triangulación: se subdivide el túnel en cuadriláteros haciendo las observaciones de forma independiente y compensando mediante el lado común entre polígonos.

6.2.1. Instrumentación

La instrumentación necesaria para la observación de redes planimétricas interiores es la siguiente: instrumentos topográficos-geodésicos de goniometría, distanciametría, giroteodolito y material auxiliar.

Instrumentos topográficos y geodésicos

6.2.1.1. Estación total

Para la observación de las redes interiores así como su enlace con las redes exteriores se deben utilizar estaciones totales para mediciones de ángulos y distancias robotizadas con seguimiento de prisma, puntería automática, secuencia de observación programable y registro electrónico de datos. Estaciones totales con precisiones nominales comprendidas entre 1 y 2 segundos centesimales, con distanciómetro de infrarrojos de $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$.

6.2.1.2. Giroteodolito

La calidad de las redes en el interior de los túneles de gran longitud depende del uso adecuado del giroscopio. En Geodesia y Topografía se utiliza en forma de teodolito giroscópico o giroteodolito. Las medidas de un giroteodolito son equivalentes a determinar acimutes astronómicos, puesto que se orienta siempre al norte geográfico. El principio del giroscopio se basa en la reacción del instrumento ante las interferencias externas afectado por el giro terrestre con oscilaciones en el sentido del eje de giro de la interferencia.

Este instrumento permite una búsqueda automatizada del norte giroscópico, pudiendo hacer las punterías a referencia también de forma automática. Este funcionamiento impersonal elimina los errores accidentales subjetivos de seguimiento y puntería, ofreciendo la precisión más alta obtenible con un sistema giroscópico mecánico. Conjunto de giroteodolito puesto en estación. El elemento central es un giróscopo Gyromat 2000 al que se le ha adaptado, en su parte superior, una estación total robotizada Leica TCA2003, que es la que ofrece la lectura angular del acimut determinado por el giróscopo. El conjunto va montado sobre una bancada que posibilita su puesta en estación sobre el pilar de observación.



Se diseñó un acoplamiento para el giroteodolito que permite estos estacionamientos, ofreciendo la debida precisión de centrado y con la necesaria robustez para garantizar la estabilidad y ausencia de vibraciones durante el funcionamiento del giroscopio.



6.2.1.3. Constante del giroteodolito

La constante del giroteodolito no es un ajuste sino una característica mecánica. Es la diferencia entre el norte giroscópico y el norte geográfico o rotacional terrestre. Sus valores se establecen en las redes de boca, en los lados exteriores orientados mediante, en principio, observaciones astronómicas a la estrella Polar para poder determinar el acimut astronómico. La diferencia entre la lectura del giroteodolito y el acimut astronómico nos da la constante K. Una vez determinado el acimut hay que realizar las correcciones por movimiento del polo, altitud del punto visado y curvatura de la plomada pues es un acimut astronómico instantáneo referido a la superficie geopotencial del punto de observación.

El problema que nos encontramos es que las observaciones astronómicas, como es lógico, no pueden realizarse en el interior de los túneles, por lo que en ellos tendremos acimutes geodésicos. Para el paso de acimut astronómico a geodésico se necesita hacer fundamentalmente: correcciones instrumentales y corrección por desviación de la vertical. La influencia de las irregularidades del campo gravitatorio terrestre (desviación de la vertical) debe ser tenida en cuenta en regiones donde el valor de dicha desviación puede ser mayor que la precisión del giroteodolito. Para calcular dicha componente es necesario conocer el geoide en la zona de trabajo, por lo que habría que determinarlo o, en su defecto, utilizar un modelo del geoide.

6.2.2. Errores en las observaciones

Los errores en las observaciones son: error angular, error longitudinal, error de estacionamiento y error de puntería por lo que el error total que se produce en una poligonal vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_l^2 + \sigma_e^2 + \sigma_p^2}$$

Si consideramos una ETR con un error de 2 cc (2 segundos centesimales) y (± 2 mm + 2 ppm), sustituyendo en la expresión obtenemos los errores de cierre en mm debido al error total en función de la longitud de la poligonal y la longitud de los ejes.

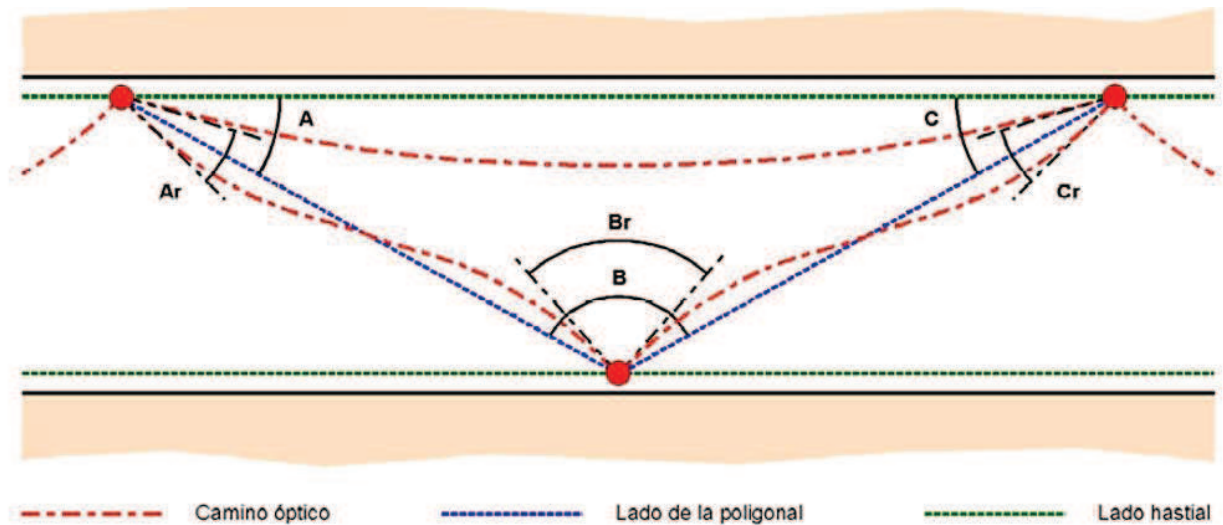
6.2.3. Refracción lateral

El fenómeno de la refracción se presenta al atravesar un haz luminoso diferentes capas de aire de distintas densidades. El error de refracción vertical es un fenómeno perfectamente conocido en el mundo de la Geodesia y de la Topografía, pero el efecto de refracción lateral es un fenómeno menos conocido. Simplificando, la refracción lateral es la misma que la refracción vertical pero actuando en una dirección perpendicular.

La solución más satisfactoria para evitar el error lateral sería realizar la poligonal por el centro del túnel pues en él el flujo de aire es laminar, no turbulento y no hay gradiente térmico al ser constantes las condiciones. Pero por lo general el centro del túnel no puede ser utilizado para llevar la poligonal pues suele ser utilizado para el transporte por lo que las poligonales se llevan por los hastiales.



La situación alternada hastial - hastial de las estaciones es la única configuración que permite una razonable compensación de la refracción lateral en la transmisión de acimut, a la par que permite su cuantificación. Por supuesto, se supone que el túnel es prácticamente recto y que los gradientes térmicos son simétricos respecto del eje del



túnel. Debe considerarse un triángulo aislado y estudiar la situación bajo condiciones ideales. Antes del planteamiento debe hacerse notar que las desviaciones representadas en la ilustración adjunta, lo mismo podrían ser en el sentido contrario, dependiendo de cómo sean en concreto los gradientes térmicos horizontales. En cualquier caso, las conclusiones del razonamiento no varían.

6.2.4. Efecto del error lateral.

El camino óptico recto (azul) que debería unir dos puntos de control se ve alterado (rojo) por el efecto de refracción lateral en el interior del túnel.

Los lados cortos A-B y B-C permiten ser observados favorablemente, siendo los destinados a la transmisión angular y al cierre angular del triángulo.

Como puede verse, los ángulos extremos A y C son igualmente afectados por la refracción, convirtiéndose en los equivalentes A_r y C_r , manteniendo sus valores. El ángulo central si se ve claramente disminuido, convirtiéndose en el B_r . El cierre angular del triángulo permite cuantificar el efecto de la refracción. El lado A-C, muy próximo al hastial, es demasiado largo, siendo su única función la citada cuantificación.

La influencia debida al error de refracción lateral utilizando giróscopo en n veces menor que utilizando ETR .

Conclusiones:

Huir siempre de visuales dispuestas a menos de 1,5 metros de las paredes del túnel, es decir, se deben evitar visuales paralelas y cercanas a los hastiales.

Utilización del giróscopo que minimiza el error debido a la refracción lateral.

6.2.5. Error de calado de túneles



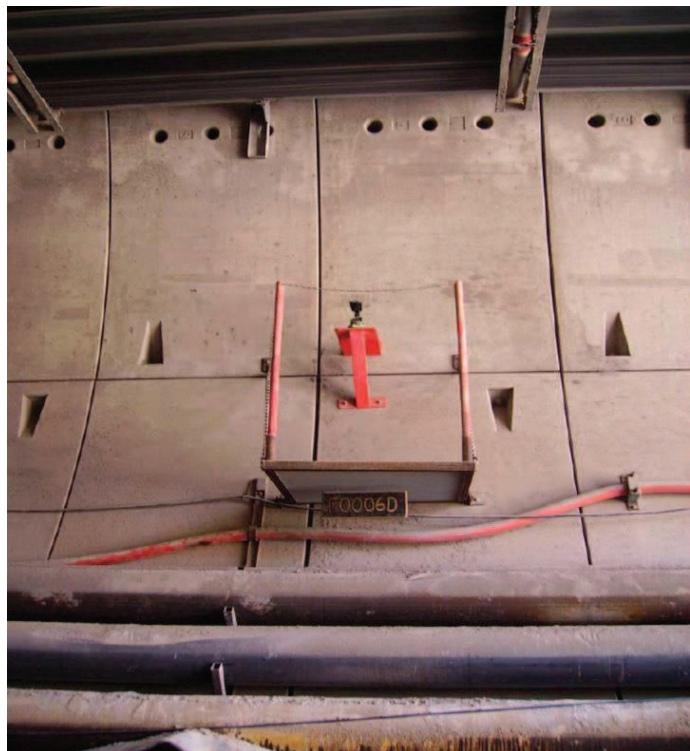
Se puede definir el error de calado en un túnel como la diferencia entre las coordenadas del punto extremo del eje teórico del túnel y las coordenadas obtenidas a partir de mediciones geodésicas y topográficas.

Si consideramos que el error admisible del calado del túnel es de 10 mm por km y teniendo en cuenta únicamente el error angular se aprecia que túneles cuya longitud es mayor de 12 km y con ejes de 125 metros supera el error admisible. Cuanto mayor es la longitud del eje de la poligonal menor es el error angular. La geometría de los túneles para trenes de alta velocidad permite visuales de estas longitudes pues el trazado no tiene grandes curvaturas. Pero el inconveniente es que la distancia de 375 metros es insuficiente para las labores cotidianas del guiado de la máquina, hay que cambiar el aparato cuando éste llega al final de la máquina y sólo en ese preciso instante.

6.2.6. Monumentación

La monumentación de los vértices de la red interior principal es un aspecto importante y depende de factores como son: el diámetro del túnel, localización de los distintos servicios. Las estaciones serán unas ménsulas o plataformas fijas permanentemente montadas en las paredes del túnel.

En cuanto a la señalización de redes secundarias el avance más significativo en control de túneles ha sido la aparición de un nuevo tipo de punterías conocidos con el nombre de “spigots” los cuales van montados sobre las paredes o en el techo del túnel. La precisión que se obtiene es comparable a los métodos tradicionales empleados en minerías.



6.3. Diseño y simulación de redes en el interior de los túneles

El diseño de las redes interiores debe estar basado en las experiencias previas y en técnicas de simulación. Permite trabajar con simulaciones de redes, a fin de evaluar la calidad de la geometría de la red proyectada y elegir la metodología de observación e instrumental necesario para obtener los resultados más precisos posibles.

Para ello se parte de la siguiente hipótesis:

- La precisión exigida en el calado del túnel es de 10 mm por km.
- Las precisiones de los instrumentos que se han utilizado para realizar la simulación se han obtenido de los distintos equipos que intervienen en las observaciones de túneles de Guadarrama o túneles de Pajares (España).
- Estación total con 1,5 cc de precisión nominal y 1 mm + 1 ppm.
- Giroteodolito de precisión nominal de 10 cc.
- Se introduce además un error de estacionamiento y puntería de 0,002 mm.
- El túnel es perforado desde los dos extremos.



Se ha realizado un análisis de poligonales por el túnel, entrando al mismo por dos bocas con lados de poligonal de 125, 250 y 375 metros, así como combinaciones de distintas longitudes y poligonales por el eje y cruzadas (zig-zag). Las simulaciones se han realizado en función del número de series de medidas tanto angulares como del giroteodolito, así como para el caso de dos túneles, sensiblemente paralelos.

La observación con giroteodolito se introduce en forma de aspa cada kilómetro y las distancias como dos medidas por eje, pues aumentar el número de series de distancia no mejora significativamente la precisión final del calado del túnel.

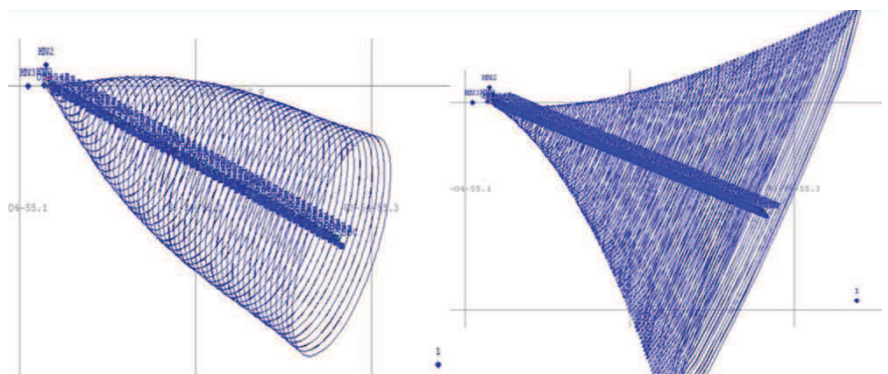
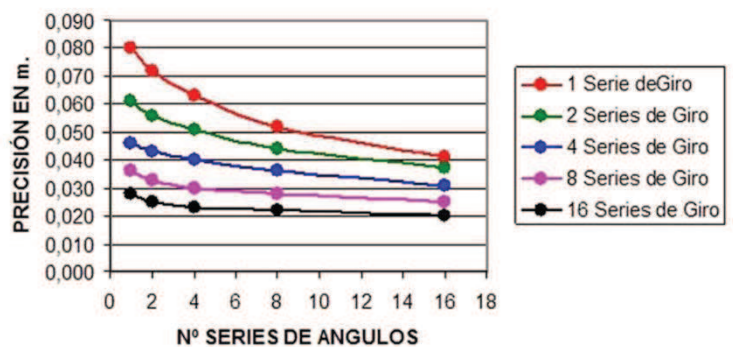
De todas las simulaciones realizadas en el estudio, se presentan las obtenidas para un túnel de 20 km de longitud con poligonales de 250 metros en zig-zag, considerando la utilización o no del giroteodolito.

En la figura se representa en el eje de abcisas el número de series angulares realizadas y en el eje de ordenadas las precisiones, al 95 %, obtenidas en la simulación en función del número de series.

Como se puede apreciar en la citada gráfica el mínimo número de series que se deberían realizar son: una de giroteodolito y 16 angulares o dos de giroteodolito y dos angulares.

En la figura se muestran las elipses de error al 95 % para dos poligonales cruzadas de longitudes 10 km y lados de 250 metros con y sin giroteodolito.

POLIGONAL CRUZADA, LONGITUD 5 km Y LADOS DE 250m

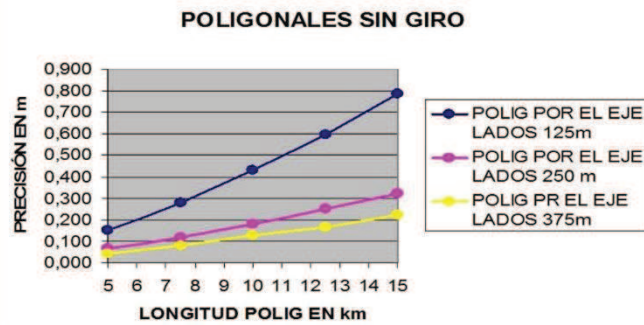


En la Tabla se muestra el resultado de la simulación para túneles de 20 km con poligonales de 10 km por cada boca sin utilizar el giroteodolito.

	Longitud de lados	Nº series angulares	Error de cierre
Poligonal por el eje	125 metros	16	0,429 metros
	250 metros	16	0,182 metros
	375 metros	16	0,126 metros
Poligonal cruzada	125 metros	16	0,294 metros
	250 metros	16	0,129 metros
	375 metros	16	0,089 metros
Poligonal cruzada	125 y 250 metros	16	0,117 metros
	125 y 375 metros	16	0,084 metros
	250 y 375 metros	16	0,073 metros
	125, 250 y 375 metros	16	0,071 metros

Como se puede apreciar: las poligonales diseñadas por el eje no entrarían en tolerancia sin utilizar el giroteodolito.

En la figura se puede ver cómo va disminuyendo la precisión de la poligonal llevada por el eje en función de su longitud y de la distancia entre ejes.



En la tabla se muestran las series angulares y de giroteodolito que se deberían realizar en función de las longitudes de las poligonales (cruzadas y con ejes de 250 metros de longitud) así como las precisiones

Longitud Poligonal	5 km	7,5 km	10 km	12,5 km	15 km
nº series giroteodolito	2	2	2	2	2
nº series de ángulos	8	4	2	2	2
Desviaciones al 95 %	0,044 m	0,069 m	0,089 m	0,101 m	0,115 m

6.4. Resultados

A partir de las conclusiones de los trabajos realizados en los Túneles de Guadarrama, y de las simulaciones anteriormente presentadas se decidió por **fijar lados de longitud de 250 metros**, cuya distancia da el mayor rendimiento con unos errores angulares perfectamente aceptables para el calado de los túneles. **Para evitar el efecto de refracción lateral la observación se ha realizado con visuales cruzadas sobre el eje del túnel de un hastial a otro que minimicen dicho efecto.**

El tipo de señalización ha sido el de ménsulas metálicas ancladas a los hastiales del túnel, niveladas y con tornillos 5/8" para estacionamiento de los equipos.

Para el diseño de la observación planimétrica de las redes en el interior de los túneles, la observación presenta tres facetas: **medida de distancias, de ángulos y de acimutes giroscópicos.**

Las mediciones angulares siempre se han realizado con el programa de «medición de series» de la TCR, con la técnica de vuelta de horizonte. Una vez realizadas las series se calculan in situ los ángulos y distancias medios además de la desviación estándar de la serie y de una medida aislada en ángulos horizontales, verticales y distancias. Si la **desviación estándar es mayor de 5 cc** se rechaza la serie. Si la desviación estándar entre series es mayor de 5 cc se repiten dos más, rechazándose la mayor y la menor. Si entonces se cumple la tolerancia mencionada, queda aceptada la observación.

Con la ayuda de satélites, se definió una red de coordenadas fijas sobre toda la superficie del proyecto, que actúan como enlace entre los planos y el terreno. A partir de esta red, se puede comprobar la dirección o el vector de ataque al túnel a través de



las galerías o pozos de acceso. Esto se hace mediante puntos de mediciones sucesivas (método poligonal de línea o traverse).

En el frente de Sedrun fue necesario transferir la medición en vertical hasta el fondo del pozo. Para definir el pie, se usaron tres plomadas de 800 metros de largo y un peso de entre 190 y 350 kilos, además de un sistema de sondeo óptico de precisión. Para definir la dirección en el fondo del pozo, se usó la propiedad física del giroscopio de rápida rotación, ya que apunta siempre hacia el norte debido a la rotación terrestre. A partir del ángulo entre el norte y la dirección planeada del túnel, fue posible definir el vector del ataque.

Como ejemplo los resultados obtenidos en el tramo Sur del túnel Este del **túnel de Pajares** (España), el cual ha sido perforado desde tres frentes (Norte, Centro y Sur) han sido los siguientes: Observación de 78 vértices con mediciones de 1.073 distancias, 20 acimutes con giroteodolito y 557 ángulos horizontales.