

UNIDAD DIDÁCTICA IV

16. MEDICIONES Y CUBICACIONES

16.1.- INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones más comunes de la Topografía es la medición de magnitudes, pudiendo ser lineales, de superficie o de volumen. La finalidad de estas mediciones puede ser muy variada: formar parte del desarrollo y control de un proyecto de ingeniería, medida de fincas, peritaciones judiciales, etc.

En el caso de un proyecto de ingeniería, la medición de los elementos que lo constituyen debe realizarse siempre, ya que permitirá estimar costes, tiempos de ejecución, maquinaria a emplear, etc., facilitando así la elaboración de un proyecto correcto y un presupuesto preciso. También durante la ejecución y al concluir el proyecto se deben prolongar las mediciones para evaluar la correcta ejecución y los materiales puestos en obra.

Estos datos se pueden obtener de dos formas: sobre plano de proyecto o sobre el terreno, pudiendo estar la obra en fase de ejecución o ya finalizada. Además, un proyecto puede sufrir modificaciones o reformas durante la ejecución que, a veces, no se recogen en los planos.

Cuando la obra es de cierta envergadura no se realiza una sola medición de los materiales utilizados al final de ésta, sino que se hacen mediciones periódicas para evaluar el desarrollo del proyecto y elaborar las *certificaciones de obra*, que permiten el abono de la obra ya ejecutada. Si aparecen discrepancias entre las mediciones aportadas por el constructor y las realizadas por la parte contratante, deben estudiarse para establecer el origen de éstas y llegar a un acuerdo entre las partes.

Como se observa, las mediciones a realizar en un proyecto constituyen un trabajo que debe ejecutarse muy cuidadosamente, pues repercute directamente en el resultado económico del mismo.

16.2.- MEDICIONES LINEALES.

Los elementos que se consideran lineales en una obra son aquellos que presentan una sección fija, como bordillos, tuberías, cableado, pinturas, etc. En el caso de la ferralla, aunque se trata de un elemento lineal y se mide de esta forma, el resultado final se da en kg.

La medición de tales materiales se puede realizar tanto en plano como en obra.

Para efectuar mediciones sobre plano en formato papel se utilizan *escalímetros*, si las alineaciones son rectas, o *curvímetros*. Este instrumento permite



Fig. 16.1. Curvímetros

medir alineaciones rectas o curvas y pueden ser mecánicos o digitales. Dispone de una pequeña rueda giratoria que recorrerá la alineación a medir y el resultado aparecerá en pantalla. Si se dispone de plano en formato digital, se utilizarán las herramientas de que disponga el programa informático utilizado.



Fig. 16.2. Rueda de medir

Quando se trata de medidas sobre terreno y las distancias son cortas, el instrumento de medición más adecuado es la cinta métrica o la *rueda de medir* u *odómetro* cuando las alineaciones no son rectas, aunque no se debe descartar la utilización de otros instrumentos de medida. Además, las distancias a medir serán siempre distancias naturales, ya que los materiales se adaptarán normalmente a la rasante de la obra.

16.3.- MEDICIONES SUPERFICIALES: AGRIMENSURA

El objetivo de la *agrimensura* es el cálculo de superficies sea cual sea su finalidad, tanto para la ejecución de un proyecto como en la determinación de superficie de fincas y la resolución de problemas relacionados con éstas.

Los métodos para el cálculo de la superficie que veremos en este tema se ejecutarán con instrumentos topográficos. Existen instrumentos de agrimensura, de gran sencillez pero de poca precisión, que obligan a una gran cantidad de trabajo de campo y no son aplicables en superficies de media y gran cuantía, por lo que no se contemplan en este apartado.

16.3.1.- Concepto de superficie agraria

Antes de comenzar con los métodos de medida de superficies se deben fijar algunos conceptos. Se denomina *superficie agraria* a la proyección sobre un plano horizontal de una porción de terreno (figura 16.3). Esta definición se basa en el hecho que todo tipo de cultivo crece verticalmente, independientemente de la inclinación que tenga el terreno sobre el que se asienta. Así, también la superficie de una edificación se mide horizontalmente. Por tanto, la *superficie real*, que es aquella en la que tenemos en cuenta las distintas pendientes, es siempre igual o mayor que la correspondiente superficie agraria. Es también interesante indicar lo que se entiende por *superficie legal*, que es la superficie que aparece en el título de propiedad de un terreno u otro documento legal y cuya extensión es semejante a la indicada por la superficie agraria.

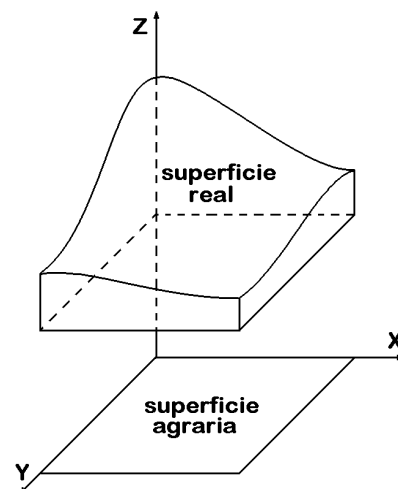


Fig. 16.3. Superficie agraria

16.3.2.- Cálculo de la superficie agraria por medidas directas sobre el terreno

Como se indicó anteriormente, las mediciones podrán realizarse directamente sobre terreno o sobre plano. A continuación se describen los métodos más comunes para la medida de superficies sobre terreno.

16.3.2.1.- Método de descomposición en triángulos

Es el método más sencillo. Consiste en descomponer la superficie a medir en una serie de triángulos, marcando los vértices con jalones u otro tipo de señal, y medir los lados de éstos mediante cinta métrica o rodete (figura 16.4).

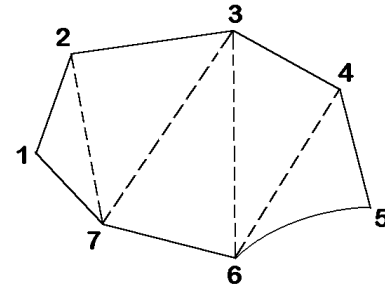


Fig. 16.4. Método descomposición en triángulos

En este método y con todos los que siguen se debe levantar un croquis con la posición aproximada de los vértices, para facilitar los cálculos posteriores y evitar equivocaciones.

La superficie de cada uno de los triángulos se calculará mediante la fórmula de Herón:

$$S = \sqrt{p(p - AB)(p - BC)(p - CA)} \quad \text{donde} \quad p = \frac{AB + BC + CA}{2}$$

La expresión está desarrollada para un triángulo irregular cuyos vértices denominamos A, B y C, siendo p el semiperímetro.

La superficie total se obtendrá sumando las superficies de los triángulos generados.

$$S_T = \sum S = S_{(1-2-7)} + S_{(2-3-7)} + S_{(3-6-7)} + S_{(3-4-6)} + S_{(4-5-6)}$$

En el caso de que un lado de la parcela sea curvo, como en la alineación 5-6 de la figura 16.5, se interpolarán los puntos necesarios para transformar la curva en una poligonal, generándose así una serie de triángulos que se calcularán como se describió anteriormente.

Existe otra versión de este método que consiste en descomponer cada uno de los triángulos marcados en dos triángulos rectángulos, que se calcularán con la fórmula apropiada. En el ejemplo (figura 16.5), denominamos 1, 2, 3,... los vértices de los triángulos iniciales y 1', 2', 3',... los vértices necesarios para obtener los triángulos rectángulos.

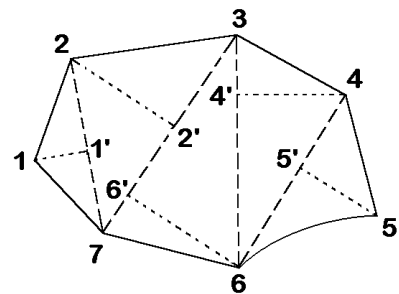


Fig. 16.5. Método de descomposición en triángulos

La superficie total será la suma de todos los triángulos calculados, como ya se indicó. Esta versión del método se utiliza mucho menos que la anterior, puesto que obliga a calcular las alturas de cada uno de los triángulos.

Este método se utilizará cuando se trate de parcelas pequeñas, en las que las distancias a medir con cinta no generen errores excesivos (véase 7.3.1.1, *Cinta métrica*). En cualquier caso, el terreno debe ser regular y prácticamente horizontal, presentando pendientes mínimas y nunca mayores del 5% ya que la cinta se apoya directamente

sobre el terreno al efectuar la medición.

16.3.2.2.- Método de radiación

Se utiliza en parcelas en las que, por su tamaño y forma, desde un punto central se divide todo el perímetro. Desde este punto central determinamos un polígono que recoge la parcela y medimos los ángulos entre alineaciones y las distancias de éstas, utilizando el método de radiación (figura 16.6).

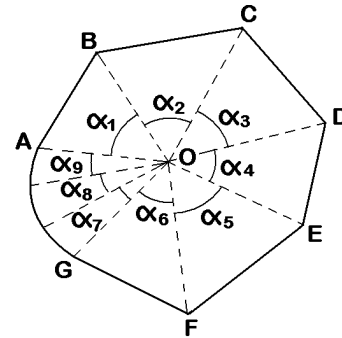


Fig. 16.6. Método de radiación

La superficie de cada uno de estos triángulos se determina aplicando la expresión que calcula la superficie de un triángulo irregular conocidos dos lados y el ángulo intermedio, y que para el primero de los triángulos sería:

$$S_{A-O-B} = \frac{OA \cdot OB \cdot \text{sen } \alpha_1}{2}$$

Los lados que no se ajusten exactamente a tramos rectos se calcularán como hemos visto anteriormente. La superficie total será la suma de las de todos los triángulos generados.

Este método se aplicará desde fincas pequeñas, como las descritas en el método de descomposición en triángulos, en las que no se cumplan las condiciones de regularidad y horizontalidad del terreno, hasta fincas grandes en las que las distancias a medir, desde el punto central a cada uno de los definen el perímetro, no generen errores excesivos (véase 10.2.3, *Causas de error en el método de radiación*).

16.3.2.3.- Método de coordenadas cartesianas

Este método es el más general y puede ser aplicado a cualquier superficie a medir, sean cuales sean sus dimensiones, forma, etc.

Se aplicará este método en el caso de que conozcamos las coordenadas cartesianas de cada una de los vértices de la parcela, siempre que el origen de coordenadas sea exterior a ésta. Dichas coordenadas se podrán calcular mediante métodos topográficos (itinerario, intersección) o GPS.

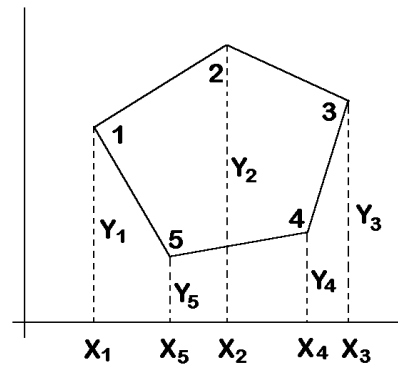


Fig. 16.7. Método de coordenadas cartesianas

En el ejemplo de la figura 16.5, la superficie total será:

$$S = (X_2 - X_1) \frac{Y_2 + Y_1}{2} + (X_3 - X_2) \frac{Y_3 + Y_2}{2} - (X_3 - X_4) \frac{Y_4 + Y_3}{2} - (X_4 - X_5) \frac{Y_5 + Y_4}{2} - (X_5 - X_1) \frac{Y_1 + Y_5}{2}$$

Introduciendo los signos negativos en los paréntesis y simplificando,

obtenemos:

$$S = \frac{1}{2} \sum (X_{n+1} - X_n)(Y_{n+1} + Y_n)$$

Si volvemos a la primera expresión, introducimos los signos negativos en los paréntesis, agrupamos y despejamos las X , obtendremos:

$$S = \frac{1}{2} \sum X_n (Y_{n-1} - Y_{n+1})$$

Cualquiera de estas dos últimas expresiones nos da la superficie calculada en función del eje X ; si la queremos referida al eje Y las expresiones son similares, sustituyendo Y por X y viceversa. Es conveniente calcular la superficie referida a ambos ejes a efectos de comprobación.

16.3.3.- Cálculo de la superficie por medidas sobre plano: planímetro

Hay que tener en cuenta que al calcular una superficie sobre plano los errores van a aumentar, porque a los errores que ya teníamos, y que eran debidos a la toma de datos sobre el terreno, hay que añadir los producidos al elaborar el plano y los que inevitablemente cometemos al tomar las medidas directamente sobre éste.

Cuando se dispone del plano en soporte informático, la medida de superficies es inmediata, utilizando las herramientas de medida de las que disponen los programas informáticos.

Cuando el plano del que se dispone está en formato papel, el instrumento adecuado para medir sobre él es un *planímetro*, aparato de muy fácil manejo y enormemente rápido puesto que elimina todo el cálculo numérico. Son de varios tipos, debidos a los distintos fundamentos en que se basan: polares, de disco, de rodillo, etc. Por el procedimiento utilizado para cuantificar la superficie pueden ser analógicos, que miden en función del movimiento transmitido a ruedecillas graduadas, o digitales, mucho más exactos.



Fig. 16.8. Planímetros

El método de trabajo es muy sencillo, consiste en, una vez indicada al aparato la escala del plano, seguir todo el perímetro de la superficie a medir con un puntero o lente del que está provisto el aparato. La superficie se obtiene simplemente leyendo sobre éste al terminar la operación. Para minimizar errores es recomendable medir varias veces la superficie y dar como resultado la media de estos valores.

A pesar de estas innegables ventajas debemos tener en cuenta que es también el procedimiento más inexacto, porque a todos los errores enunciados anteriormente debemos unir los cometidos por el operario al utilizar el planímetro y los propios de fabricación de éste.

Con todo lo anterior, y a modo de resumen, podemos decir que la utilización de un método u otro para el cálculo de la superficie debe venir impuesto por las

necesidades de precisión del trabajo que estamos realizando.

16.3.4.- Deslindes y parcelaciones

En el caso de medidas de fincas se deben conocer conceptos como los siguientes:

Deslinde es la acción de definir y señalar los límites de una propiedad respecto a las adyacentes. Estos límites deben definirse claramente sobre el terreno mediante hitos, mojones, caminos, etc.

La *parcelación* o división de un terreno es uno de los problemas más comunes en agrimensura. Las causas que lo provocan pueden ser de todo tipo: venta, permuta, testamento, etc.

Generalmente, al efectuar una parcelación se debe atender a una serie de premisas impuestas por los propietarios: parcelas de distinta superficie, que éstas sean perpendiculares o paralelas a una dirección, que concurren en un punto, etc. Todo esto se resuelve geoméricamente sobre el plano y posteriormente se replantean los nuevos lindes sobre el terreno. Por tanto, deslinde y parcelación son dos operaciones íntimamente unidas.

Antes de proceder a dividir geoméricamente un terreno debemos tener en cuenta su *valor unitario*, si éste es general o varía para distintas zonas del mismo. Entendemos por valor unitario el valor específico del terreno en función del tipo de suelo, el uso, la infraestructura con la que cuenta, etc. Cuando este valor es el mismo para todo el terreno, la parcelación es un problema puramente geométrico, pero en caso de ser distinto primará este factor frente a la superficie.

16.4.- MEDICIONES DE VOLÚMENES

16.4.1.- Introducción

Uno de los capítulos importantes en cualquier proyecto de ingeniería es el relativo al movimiento de tierras, consistente en una modificación de la forma original del terreno afectado por el proyecto, con el fin de obtener una superficie regular sobre la que se situarán las correspondientes obras.

La explanación del terreno se realiza mediante excavación o por relleno, dependiendo de la altitud final de la plataforma a obtener.



Fig. 16.9. Pendiente

La pendiente suele expresarse en tanto por ciento: una pendiente del 5% indica que para subir o bajar 5m se recorren 100m de distancia reducida. La calcularemos dividiendo la diferencia de altitudes de los puntos extremos por la distancia reducida entre ambos y multiplicando por 100. En cada caso habrá que indicar si la pendiente es ascendente o descendente.

En otros casos se prefiere indicar la pendiente como una fracción, que se obtiene representando en el numerador la distancia vertical y en el denominador la

correspondiente distancia horizontal.

Algunos ejemplos de proyectos en los que es preciso realizar movimiento de tierras:

- Excavación para construir los cimientos de un edificio o una nave.
- Relleno de una parcela para aplanarla.
- Excavación de zanjas y canales para riego; excavación para enterrar tuberías y conducciones.
- Excavación/relleno para obtener la plataforma para una vía de comunicación.
- Explotaciones mineras, a cielo abierto o subterráneas.

Una vez decidida la posición más conveniente de la plataforma, es necesario calcular los volúmenes de tierras a mover, para poder estimar los costes implicados en la obra.

16.4.2.- Conceptos básicos

Se denomina *planta* de un proyecto a la proyección de éste sobre un plano horizontal y representado en el sistema de planos acotados. Es el plano del proyecto.

El conjunto de puntos, alineaciones o superficies definidos en la planta de proyecto y llevados al terreno natural constituyen la *traza* del proyecto.

Se denomina *rasante* a la posición definitiva a ocupar por los elementos anteriormente enumerados después de realizada la operación de movimiento de tierras. La rasante suele ser horizontal. En algunos casos, como la construcción de carreteras, es frecuente que haya tramos con cierta pendiente, tanto ascendente como descendente. Asimismo, para contrarrestar la fuerza centrífuga de los vehículos, se construyen los tramos curvos con una determinada inclinación, *peralte*, en el sentido transversal.

Desmote es la operación consistente en retirar tierras hasta llegar a una altitud determinada, en la que se sitúa la rasante. Por tanto, habrá que realizar desmote en las zonas en que la altitud de la rasante proyectada sea inferior a la del terreno original (figura 16.10).

Terraplén es la operación contraria, es decir, la consistente en rellenar una zona de terreno hasta obtener una plataforma. Se realizará terraplén en aquellas zonas en las que la altitud del terreno sea inferior a la de la rasante (figura 16.10).

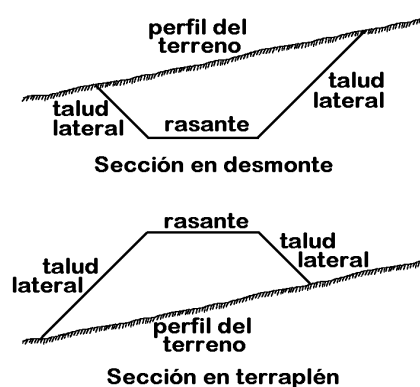


Fig. 16.10. Desmote y terraplén

Los *taludes laterales*, tanto en desmote como en terraplén, son superficies planas y su pendiente dependerá de las características del material en que se excava o con el que se rellena. En este último caso, es decir en terraplén, su inclinación oscila entre 30° y 45°

El proyecto debe estudiarse de forma que las rasantes en las distintas zonas

sean tales que, dentro de lo posible, se compensen los volúmenes de tierras en desmonte con los de terraplén, de manera que se minimice el movimiento de tierras, que es una operación cara. Todo esto, naturalmente, sin perjuicio de la calidad de la obra que se proyecta.

Si la calidad de las tierras de desmonte permiten su utilización en terraplenes, se debe tener presente, en el acopio provisional, que las tierras arrancadas sufren un esponjamiento en torno al 20%, que desaparecerá o incluso tendrán un volumen menor del inicial una vez compactadas.

16.4.3.- Cubicación: método de los perfiles

Cubicar es calcular los volúmenes de tierras a mover en un determinado proyecto, especificando si se trata de desmonte o de terraplén. Los métodos de cubicación que vamos a estudiar dan resultados aproximados, pero suficientes para la mayoría de los proyectos. Multiplicando los volúmenes obtenidos por los costes unitarios de las operaciones de arranque, carga y transporte de tierras, podemos estimar las inversiones necesarias para cubrir esta fase del proyecto.

El método de los perfiles es muy empleado en los proyectos de obra lineal (carreteras, vías férreas, canalizaciones, etc.) aunque puede también utilizarse en trabajos de otro tipo.

En primer lugar determinaremos, normalmente sobre planos, el *perfil longitudinal*, es decir, la traza más conveniente para la rasante de nuestro proyecto. Este perfil se señala sobre el terreno y se procede a realizar su levantamiento definitivo. Para ello se emplea el método itinerario, operando de la forma que ya conocemos. La distancia entre estaciones consecutivas dependerá de la magnitud del proyecto, pero siempre debemos procurar situar una estación en cada cambio de pendiente de la rasante y en cada curva.

Desde cada estación se levanta un *perfil transversal*, es decir, en dirección perpendicular a la del perfil longitudinal. Los perfiles transversales se numeran y se marcan en el terreno con estacas u otro tipo de señales. En algunos proyectos bastará con determinar estos perfiles directamente sobre el plano, aunque siempre será necesario señalar sobre el terreno las obras a realizar, operación que se conoce con el nombre de *replanteo*.

La elección de los puntos a tomar, que serán todos los necesarios para representar con precisión tanto el terreno como la rasante, dependerá de la escala y de la finalidad de los perfiles transversales. Deben incluirse obligatoriamente aquellos puntos que supongan cambios de pendiente, accidentes del terreno, vías de comunicación, infraestructuras, etc. Para el resto se suele adoptar una distancia regular.

La obtención de los perfiles puede ser gráfica, cuando se dispone de cartografía adecuada, o mediante técnicas topográficas. En el primero de los casos, una vez dibujado el perfil, se toman los puntos de corte con las curvas de nivel y los accidentes principales del terreno (vaguadas, divisorias de aguas, etc.). Cuando se utilicen técnicas topográficas se debe tener en cuenta la precisión requerida para

elegir tanto el método de trabajo como el instrumental a utilizar.

El objetivo de estos levantamientos es conocer, con suficiente aproximación, el perfil del terreno en la zona afectada por el proyecto. La comparación entre el perfil del terreno y el que hemos proyectado para la rasante, nos permitirá calcular los volúmenes de tierras a mover.

La forma de representar los perfiles longitudinales de la rasante y el terreno está normalizada. El modelo oficial de perfil longitudinal debe incluir (figura 16.11):

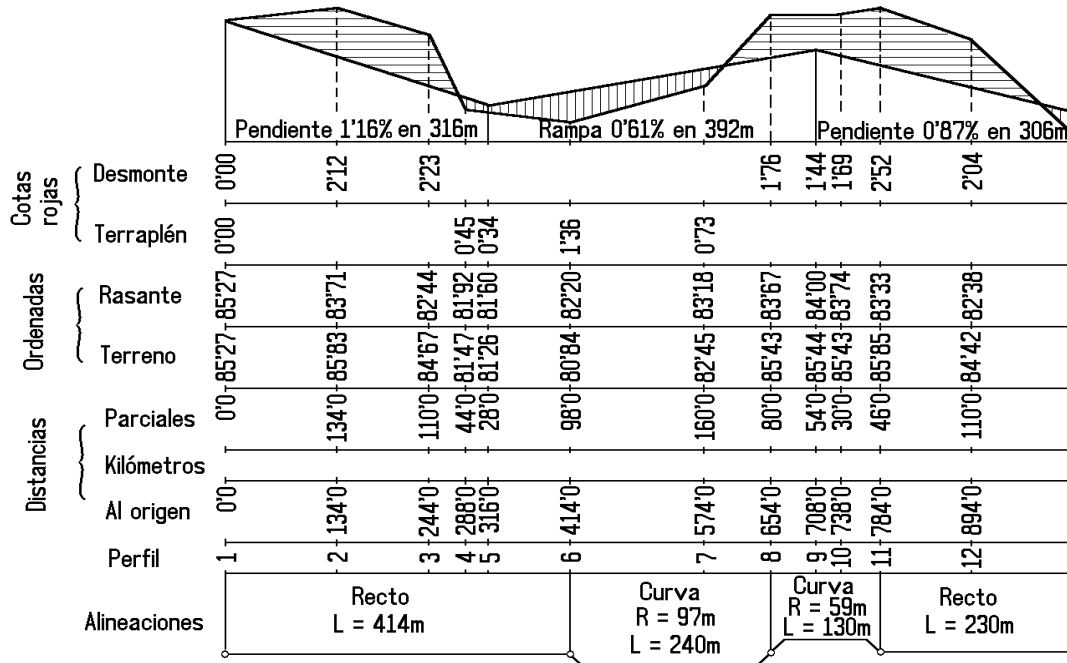


Fig. 16.11. Modelo oficial de perfil longitudinal

- El perfil de la rasante.
- El perfil del terreno. La escala vertical empleada para trazar estos dos perfiles suele ser diez veces mayor que la horizontal. Las cotas de los distintos puntos se llevan a partir de una recta horizontal, *plano de comparación*, al que se asigna una altitud conveniente, para evitar que los perfiles queden a una altura excesiva respecto a las anotaciones que ocupan la parte inferior del documento.
- Las *cotas rojas*, que son las diferencias, en cada perfil, entre las altitudes del terreno y de la rasante. Se anotan en una u otra línea, según la sección correspondiente sea en desmorte o en terraplén.
- Las *ordenadas*, que son las altitudes del terreno y de la rasante en cada uno de los perfiles.
- Las distancias reducidas, entre perfiles consecutivos y con relación al perfil inicial. Entre ambas se intercala una escala kilométrica.
- El número de perfil.
- Las *alineaciones*, donde se indica si se trata de tramos rectos o curvos y la longitud de cada tramo. En el caso de tramos curvos, se anota también el radio de curvatura y el parámetro si se trata de una clotoide y, mediante pequeños círculos, los cambios de dirección.
- Además, se incluye información sobre los peraltes y los acuerdos verticales.

Los datos correspondientes a la rasante se trazan con tinta roja y los correspondientes al terreno con tinta negra.

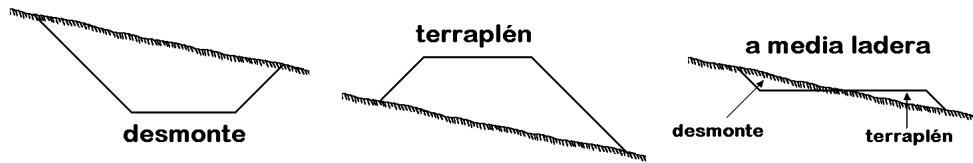


Fig. 16.12. Perfiles transversales

Los perfiles transversales (figura 16.12) se emplean para calcular el movimiento de tierras. Una vez determinadas las pendientes que deben tener los taludes laterales, trazaremos dichos perfiles, incluyendo en cada uno de ellos la sección del terreno y la de la rasante y los taludes. Pueden ser de tres tipos: perfil en desmorte, perfil en terraplén o perfil *a media ladera*.

Los perfiles a media ladera son perfiles mixtos, en los que la rasante corta al terreno en sentido transversal, y tienen una parte en desmorte y otra en terraplén.

La superficie de cada perfil se determina sobre plano, empleando alguno de los métodos de cálculo de superficies que hemos estudiado. Esta superficie es la comprendida entre la sección del terreno y la de la rasante y los taludes laterales, correspondientes a ese perfil. Es preciso especificar si se trata de un perfil en desmorte o en terraplén. En los perfiles a media ladera se calculan por separado las superficies en desmorte y en terraplén. El volumen de tierras a mover entre perfiles consecutivos dependerá de la superficie de cada uno de los perfiles y de la distancia reducida entre ellos. Pueden darse los siguientes casos:

- **Dos perfiles en desmorte:** Si D_1 y D_2 son las superficies correspondientes a los dos perfiles y d la distancia reducida entre ellos (figura 16.13), el volumen de tierras se obtiene por la expresión:

$$D_T = \frac{D_1 + D_2}{2} d$$

Naturalmente, en este caso todo el volumen D_T corresponde a desmorte.

- **Dos perfiles en terraplén:** Siendo T_1 y T_2 las superficies de los perfiles y d la distancia reducida (figura 16.14), será:

$$T_T = \frac{T_1 + T_2}{2} d$$

El volumen T_T será en terraplén.

- **Un perfil en desmorte y otro en terraplén:** Sean D y T las superficies correspondientes y d la distancia reducida. Entre ambos perfiles existirá un punto

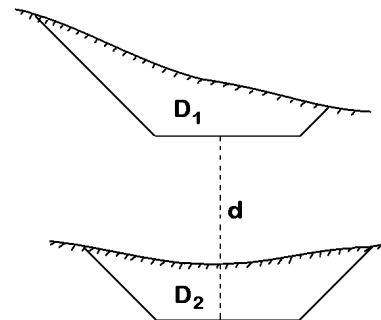


Fig. 16.13. Dos perfiles en desmorte

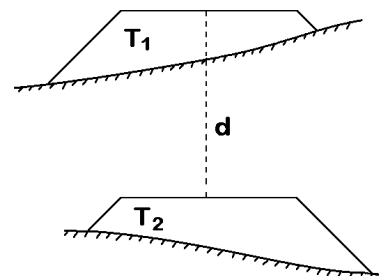


Fig. 16.14. Dos perfiles en terraplén

en que la rasante corta al terreno y que puede suponerse que corresponde a un perfil de superficie cero (figura 16.15). Suponemos, además, que las distancias reducidas d_1 y d_2 de dicho punto a cada uno de los perfiles son proporcionales a las superficies D y T .

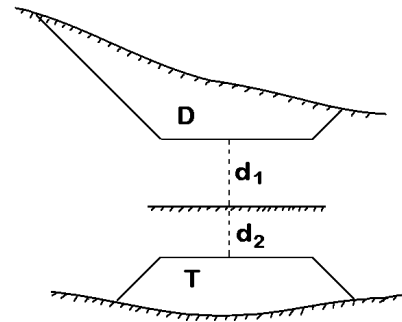


Fig. 16.15. Un perfil en desmonte y otro en terraplén

Por tanto, se debe cumplir: $d_1 + d_2 = d$. Las distancias serán:

$$d_1 = \frac{D}{D+T} d \quad d_2 = \frac{T}{D+T} d$$

Calculamos el volumen de tierras en desmonte, entre el primer perfil y el punto intermedio (superficie = 0) y el volumen en terraplén, entre dicho punto y el segundo perfil:

$$D_T = \frac{D}{2} d_1 \quad \text{o, directamente, } D_T = \frac{D}{2} \frac{D}{D+T} d \quad D_T = \frac{D^2}{D+T} \frac{d}{2}$$

$$T_T = \frac{T}{2} d_2 \quad \text{o, directamente, } T_T = \frac{T}{2} \frac{T}{D+T} d \quad T_T = \frac{T^2}{D+T} \frac{d}{2}$$

Aplicando expresiones similares a las de los casos anteriores.

- Un perfil en desmonte y otro a media ladera:** Por el punto del segundo perfil en que la rasante corta transversalmente al terreno, trazamos un plano vertical, perpendicular a los de los perfiles. Estos quedan divididos en cuatro partes, en el ejemplo de la figura 16.16 tres en desmonte y una en terraplén. Calculamos las cuatro superficies D_1 , D_2 , D_3 y T_1 . Entre D_1 y D_3 aplicamos las expresiones del primer caso y entre D_2 y T_1 las del tercero.

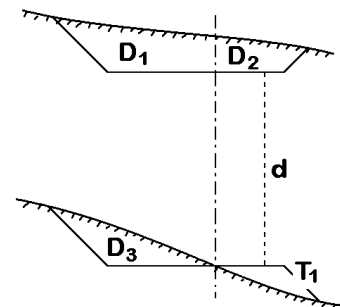


Fig. 16.16. Un perfil en desmonte y otro a media ladera

- Dos perfiles a media ladera:** Trazamos un plano vertical, como en el caso anterior, por el punto en que la rasante corta transversalmente al terreno en el primer perfil. Si este plano contiene al punto de intersección de la rasante y el terreno en el segundo perfil, como en el ejemplo de la figura 16.17, calcularemos separadamente el volumen en desmonte entre D_1 y D_2 y el volumen en terraplén entre T_1 y T_2 , aplicando las expresiones de los dos primeros casos.

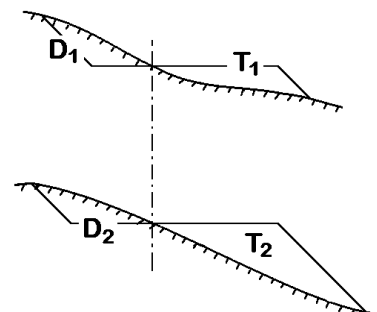


Fig. 16.17. Dos perfiles a media ladera

Si la pendiente del terreno en el segundo perfil es de signo contrario a la del primer perfil, corresponderá la parte de desmonte del primer perfil con la

parte de terraplén del segundo y la parte de terraplén del primero con la de desmonte del segundo. Aplicaremos entonces las expresiones que hemos visto para el tercer caso.

- **Dos perfiles a media ladera, no correspondiendo los puntos de corte:** En este caso trazamos dos planos verticales, uno por cada punto de corte de la rasante y el terreno. Cada sección queda dividida en tres partes, cuyas superficies se calculan por separado. En el ejemplo de la figura 16.18, aplicaremos las expresiones del primer caso entre D_1 y D_2 , las del tercer caso entre T_1 y D_3 y las del segundo caso entre T_2 y T_3 .

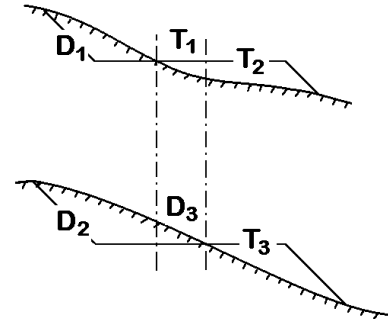


Fig. 16.18. Dos perfiles a media ladera, no correspondencia de puntos de corte

En todos los casos se sumarán por un lado todos los volúmenes correspondientes a desmonte y por otro todos los correspondientes a terraplén, para calcular los volúmenes totales entre las dos secciones.

Una vez determinado el movimiento de tierras entre cada dos secciones consecutivas del proyecto, se calcularán los volúmenes totales de tierras a mover, separando, como siempre, los correspondientes a desmonte y a terraplén.

16.4.4.- Otros métodos de cubicación

Antes de pasar a comentar otros métodos de cubicación se debe indicar que a veces se pueden encontrar elementos cuya forma corresponde a una figura geométrica regular, cubos, prismas, pirámides, etc., esos casos se aplicarán las expresiones correspondientes.

Curvas de nivel

Para calcular el volumen de tierras aproximado entre dos curvas de nivel, determinaremos las superficies S_1 y S_2 encerradas por cada una de ellas y actuaremos como si se tratase de un tronco de cono cuyas bases planas son las superficies que hemos determinado y cuya altura es la equidistancia h :

$$V = \frac{S_1 + S_2}{2} h$$

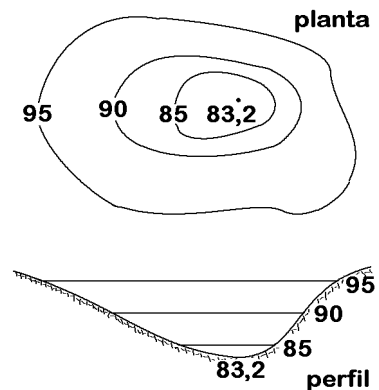


Fig. 16.19. Curvas de nivel

Si se tratase de rellenar una depresión, como la representada en la figura 16.19, hasta la cota 95, calcularíamos las superficies encerradas por cada curva de nivel S_{95} , S_{90} , S_{85} . La equidistancia es de 5m. El volumen entre la curva 85 y el punto inferior (cota 83,2) lo calcularemos suponiendo que se trata de un cono, de base la curva de nivel y de altura: $85 - 83,2 = 1,8m$. Los volúmenes vendrán dados por:

$$V_{95-90} = \frac{S_{95} + S_{90}}{2} 5$$

$$V_{90-85} = \frac{S_{90} + S_{85}}{2} 5$$

$$V_{85-83,2} = \frac{S_{85}}{2} 1,8$$

y el volumen total será la suma de los obtenidos.

La aplicación de este método, como la del de los perfiles, supone una simplificación de la realidad. Los resultados serán tanto más precisos cuanto menor sea la equidistancia de curvas de nivel y cuanto mayor sea la escala del plano.

Prismatoide

Un prismatoide es un cuerpo limitado por planos, cuyas caras extremas son paralelas y tienen el mismo número de lados. Para calcular el volumen, aplicaremos la expresión:

$$V = d \frac{S_1 + 4 S_2 + S_3}{6}$$

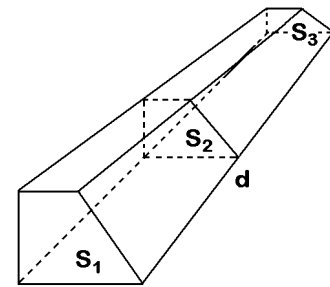


Fig. 16.20. Prismatoide

siendo S₁ y S₃ (figura 16.20) las superficies de las secciones extremas y S₂ la de la sección media.

Esta expresión da resultados más exactos que las empleadas en el método de los perfiles, por lo que puede emplearse cuando las cubriciones deban hacerse con cierta precisión, como en el caso de proyectos en que el m³ de material es especialmente caro.

Cuando en el volumen a mediar no hay posibilidad de calcular la superficie media se puede aplicar una expresión semejante a las utilizadas en el método de curvas de nivel y en el de los perfiles:

$$V = d \frac{S_1 + S_3}{2}$$

El volumen obtenido por este método es superior al que se obtiene mediante la expresión del prismatoide, pudiendo llegar hasta el 10%.

Prisma de base triangular.

Cuando se dispone del proyecto y se puede acceder a las coordenadas de los puntos o se pueden obtener mediante cálculos topográficos, hay distintos métodos a aplicar para calcular el volumen de tierras. El primero y más exacto es el del prisma de base triangular.

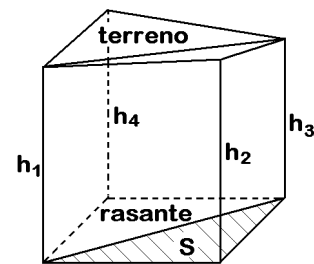


Fig. 16.21. Prisma de base triangular

En este método se divide el volumen a cubicar en prismas de base triangular y se calcula cada uno de ellos independientemente utilizando la siguiente expresión:

$$V = S \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}$$

Siendo h el desnivel entre el terreno y la rasante a conseguir y S la superficie regular del triángulo (figura 16.21). Si la rasante es horizontal se calculará la superficie sobre ésta, si presenta una determinada pendiente se puede calcular en una posición media prescindiendo de las coordenadas altimétricas de los puntos.

Este método permite calcular volúmenes con gran precisión, siempre y cuando los triángulos se adapten correctamente al terreno.

Cuadrícula

Es un método apropiado para determinar el movimiento de tierras necesario para el relleno o excavación de parcelas, especialmente cuando la pendiente del terreno sea bastante uniforme y no existan accidentes importantes.

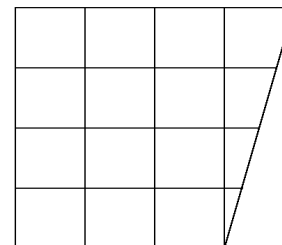


Fig. 16.22. Cuadrícula; planta

Comenzamos por trazar una cuadrícula sobre el terreno, empleando los instrumentos necesarios, y nivelar todos sus vértices. La cuadrícula estará formada por cuadrados (o rectángulos) y triángulos y sus dimensiones dependerán de la precisión que se pretenda alcanzar en la cubicación (figura 16.22).

En cada cuadrilátero o triángulo consideraremos el prisma formado tomando como bases el terreno y la plataforma final a obtener. En el caso de un cuadrado o de un rectángulo, siendo h_1, h_2, h_3 y h_4 las alturas del terreno con relación a la rasante y S la superficie de la sección recta del prisma (figura 16.21), el volumen de tierras será:

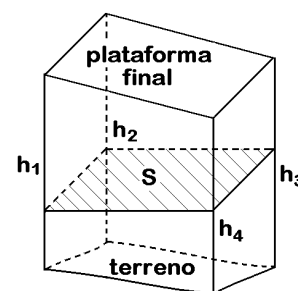


Fig. 16.23. Cuadrícula

$$V = S \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4}$$

Cuando se generen triángulos se aplicará la expresión obtenida en el apartado anterior.

Generalización de la altura media

Finalmente, cuando en el terreno no se puede plantear una malla regular o la precisión exigida no es elevada, se puede aplicar este método. Para ello se necesita calcular una nube de puntos correctamente distribuida por toda la superficie y la superficie horizontal generada por el perímetro (figura 16.24). A continuación aplicaremos una generalización de las expresiones usadas anteriormente:

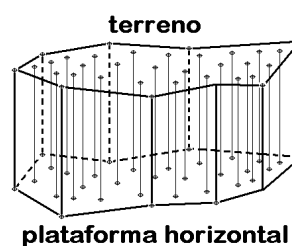


Fig. 16.24. Generalización de la altura media

$$V = S \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n}$$

Este método no suele ser muy preciso, porque es compleja la elección de los puntos que representen correctamente el terreno.

17. REPLANTEOS

17.1.- INTRODUCCIÓN. CONCEPTOS BÁSICOS.

Replantear consiste en materializar sobre el terreno un punto, o una serie de puntos que forman parte de una alineación recta o curva, cuya posición con relación a otro u otros puntos ya situados es conocida. Por esto, se dice que el replanteo es el procedimiento inverso al levantamiento topográfico.

La realización de un replanteo puede estar motivada por muy diversas causas; entre ellas podemos citar la reposición de un vértice desaparecido, ubicar un proyecto de obra civil, parcelaciones y deslindes, etc. En cualquier caso, el replanteo consiste en materializar puntos individuales que tendrán significado por ellos mismos o formarán parte de alineaciones rectas o curvas.

Los datos necesarios para este trabajo dependerán del objetivo del replanteo. Según los casos, estos datos se obtienen de las coordenadas, conocidas, de los puntos a replantear o de medidas sobre un plano. Debemos tener en cuenta que si replanteamos a partir de las coordenadas, la precisión que tendremos será mucho mayor que si partimos de medidas sobre un plano, pues en este segundo caso a los errores cometidos en el levantamiento, y que están incluidos en las coordenadas, se superponen los errores producidos al realizar el plano y al efectuar nosotros las mediciones pertinentes sobre éste. De la precisión del plano y de los puntos de coordenadas conocidas dependerá, por tanto, la precisión final del replanteo. Además, estos errores serán mayores cuanto menor sea la escala del plano.

Los instrumentos a utilizar para realizar un replanteo son los ya conocidos: estación total, nivel, cinta métrica, etc. La elección de uno u otro dependerá tanto del método elegido para replantear como de la precisión a exigir a los resultados. Además, se utilizará toda una serie de elementos auxiliares (elementos de señalización, señales de puntería, basadas, plomadas, etc.) ya estudiados anteriormente.

Se define como *replanteo externo* al realizado desde puntos de coordenadas conocidas externos a la obra (*bases de replanteo*). Los *replanteos internos* son los realizados desde puntos pertenecientes al proyecto y ya replanteados desde bases de replanteo. Esto supone acumulación de errores, por lo que sólo se suele utilizar para zonas no visibles desde las bases de replanteo y en las que la precisión requerida no sea elevada.

Las *bases de replanteo* constituyen la *red de apoyo* de un replanteo (red primaria). Estas bases se deben materializar en lugares que no se vean afectados por el desarrollo del proyecto. Se debe indicar que, durante el desarrollo normal del proyecto, puede ocurrir que determinadas bases de replanteo dejen de ser útiles y deban materializarse otras nuevas (red secundaria). En cualquiera de los casos, todas estas bases deben ser medidas con la máxima precisión, utilizando los métodos de intersección o de itinerario con equipo de poligonación.

La *posición absoluta* de un punto replanteado es la ocupada por éste según el sistema de coordenadas empleado. Sin embargo, un proyecto está constituido por numerosos puntos; por ello, se conoce como *posición relativa* de un punto a su situación respecto al resto de puntos del proyecto. Ambas posiciones deben ser tenidas en cuenta en la comprobación de un replanteo.

Se conoce como *ajuste* de un proyecto a una serie de pequeñas modificaciones a realizar en el proyecto para propiciar el encaje de éste en su entorno. Esto viene provocado por modificaciones del terreno posteriores a la elaboración del proyecto, incorrecciones en el plano topográfico de base u omisiones en el proyecto.

17.2.- REPLANTEO DE PUNTOS

El replanteo de los puntos se puede realizar siguiendo tres métodos distintos:

17.2.1.- Por coordenadas polares.

Consiste en calcular sobre proyecto, a partir de una base de replanteo BR , el acimut y la distancia al punto P del proyecto que deseamos replantear. Posteriormente, ya sobre el terreno, estacionamos una estación total en dicha base de replanteo y, tras orientarla, materializamos los datos antes obtenidos.

También se puede realizar el replanteo a partir de un ángulo horizontal α y una distancia. Para ello el ángulo se debe calcular desde una alineación que pueda reproducirse en el terreno.

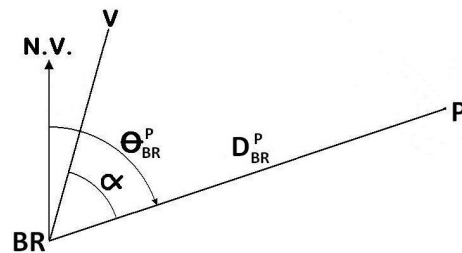


Fig. 17.1. Método de coordenadas polares

El proceso para el replanteo de un punto será el siguiente (figura 17.1): una vez estacionada la estación total en la base de replanteo, la orientaremos respecto al norte o a una referencia arbitraria, como se ha explicado en los párrafos precedentes. A continuación giraremos el instrumento hasta alcanzar el acimut o el ángulo α de la alineación del punto a replantear y no se moverá acimutalmente este instrumento hasta finalizar el replanteo de ese punto. En este momento se hará entrar en la alineación al operario que lleva el prisma, indicándole los desplazamientos necesarios. Se recomienda realizar esto visando el extremo inferior del jalón. Una vez el jalón en la alineación, se cabecea el anteojo hasta visar el prisma y se realiza la medida de la distancia, determinándose el desplazamiento necesario hasta el punto P . Este proceso se repite cuantas veces sea necesario hasta replantear el punto. Es de gran ayuda utilizar una cinta métrica para medir sobre el terreno la distancia, así como unos intercomunicadores entre el operario del instrumento y el del prisma.

El error de un punto replanteado con este método se calculará de forma semejante a lo explicado en el método planimétrico de radiación (véase 10.2.3).

El error en distancia (e_d) se obtendrá en función del error accidental del instrumento y de la distancia al punto replanteado (E_d).

$$e_d = E_d$$

De forma similar, el error angular (e_a) dependerá del error accidental en la medida del ángulo (E_a) y de la distancia. Se debe tener en cuenta que, como el ángulo se obtiene a partir de dos visuales, el error se multiplica por $\sqrt{2}$. Para expresarlo en metros haremos:

$$e_a = \frac{E_a}{r} \sqrt{2} D$$

siendo r el número de segundos de un radián.

Los dos errores definirán una elipse de tolerancia (véase 12.1.3), que se muestra en la figura 17.2 y en la que estará incluido el punto replanteado.

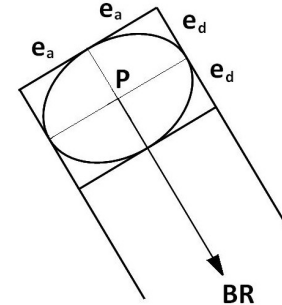


Fig. 17.2. Elipse de error

Las ventajas de este método son muchas: precisión, rapidez, facilidad, etc., lo que hace que sea el método más utilizado.

17.2.2.- Por abscisas y ordenadas.

Para poder aplicar este método necesitamos una base topográfica (dos puntos de coordenadas conocidas y visibles entre sí) materializada tanto en el proyecto como sobre el terreno. Para replantear cualquier punto P se calculará en el proyecto la distancia perpendicular de dicho punto a la base $BR1-BR2$, definiéndose un punto H , y a continuación la distancia de éste a cada uno de los extremos de la base (figura 17.3).

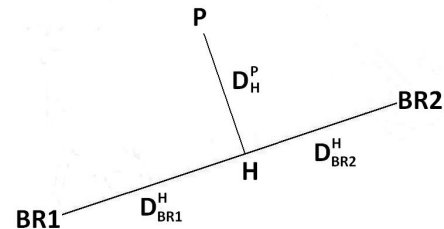


Fig. 17.3. Método de abscisas y ordenadas

Posteriormente, sobre el terreno, basta con estacionar en uno de los extremos de la base y medir la distancia hasta el punto H . A continuación se estaciona en H y tras comprobar las distancias a los extremos de la base, se lanza una visual perpendicular a la base y de longitud la calculada hasta el punto P . Para replantear este punto se hace entrar en la alineación a un operario con un jalón porta-prisma y se mide la distancia, de forma semejante a la descrita en el método anterior. Cuando la precisión exigida es poca, también puede aplicarse este método con cinta métrica y escuadra de prismas.



Fig. 17.4. Escuadra de prismas

La *escuadra de prismas* (figura 17.4) es un instrumento óptico que permite, al tiempo que se observa una línea determinada, colimar una línea perpendicular a la anterior y que pasa por el punto de observación. Esto se consigue mediante prismas que desvían en ángulo recto un rayo luminoso. La escuadra se suele colocar sobre un bastón dotado de nivel esférico.

Este método tiene la ventaja de la simplicidad, pero supone un doble estacionamiento para replantear un punto. Aunque, cuando son varios los puntos a replantear, es suficiente estacionar una vez en el extremo de la base, marcar todas las

distancias sobre ella, y después estacionar en cada uno de esos puntos para marcar la perpendicular.

17.2.3.- Por intersección.

En este método son necesarias dos bases de replanteo, en las que se deben estacionar simultáneamente dos equipos topográficos para replantear cada punto.

Sobre proyecto se debe resolver el triángulo formado por las dos bases de replanteo ($BR1$ y $BR2$) y el punto a replantear (P), obteniendo los datos, ángulos o distancias, que nos permitan reproducir sobre el terreno dicho triángulo y obtener el punto a replantear.

Mediante ángulos:

Estacionados los instrumentos topográficos en $BR1$ y $BR2$, se orientan y se introducen θ_{BR1}^P y θ_{BR2}^P respectivamente. En el punto donde se cruzan ambas visuales estará situado el punto P .

También puede resolverse el replanteo calculando los ángulos α y β , interiores del triángulo $BR1-BR2-P$. En este caso, una vez estacionados los instrumentos en $BR1$ y $BR2$ se visarán entre sí, poniendo en esa alineación el 0 de su limbo horizontal y, a continuación, girando los ángulos calculados en el sentido que corresponda.

En ambos casos, un operario con un jalón se irá moviendo sobre el terreno hasta que quede simultáneamente visado por ambos instrumentos.

El error del punto replanteado se calculará de forma semejante al descrito en el método planimétrico intersección (véase 12.1.3), calculando la elipse de tolerancia a partir de las visuales.

Mediante distancias:

En este caso, desde cada uno de los instrumentos se visará simultáneamente a un prisma, preferiblemente de 360° (véase 6.7.3.), de manera que, cuando se obtengan las distancias D_{BR1}^P y D_{BR2}^P desde cada una de las bases de replanteo, el punto donde se encuentre el prisma corresponderá al punto al replantear. Cuando la precisión requerida sea escasa, las distancias cortas y la pendiente e irregularidades del terreno lo permitan, podrá reproducirse este proceso con ayuda de cinta métrica.

El error se obtendrá también como el descrito para el método planimétrico

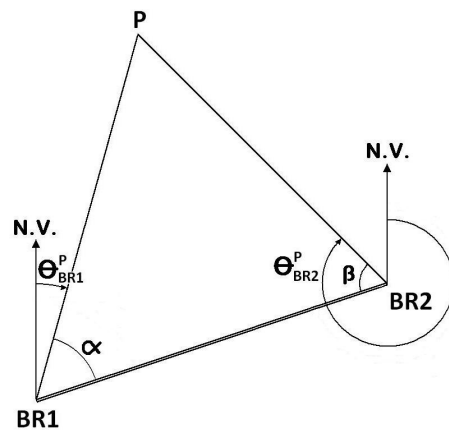


Fig. 17.5. Método de intersección por ángulos

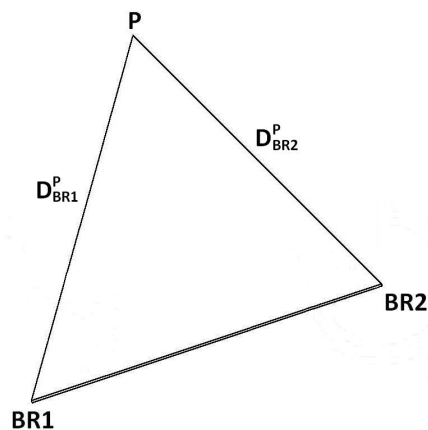


Fig. 17.6. Método de intersección por distancias

intersección, pero resuelto a partir de distancias (véase 12.2.2).

Cualquiera de los dos casos es un método preciso para replantear, pero la necesidad de utilizar dos instrumentos simultáneamente puede considerarse una desventaja.

17.3.- REPLANTEO DE ALINEACIONES RECTAS

El replanteo de una alineación recta se puede realizar desde una o varias bases de replanteo exteriores a la alineación y utilizando cualquiera de los métodos de replanteo antes descritos.

También puede realizarse este replanteo desde puntos pertenecientes a la alineación. En este caso, debemos disponer de los puntos extremos de la alineación, previamente materializados sobre el terreno. Si los dos puntos son visibles entre sí replanteamos la alineación, marcándola mediante jalones, con ayuda de la vista, si la distancia entre los puntos es pequeña (menor de 400m), o con ayuda de un goniómetro para distancias mayores. En este segundo caso, podemos replantear a partir de ambos puntos extremos o desde un punto intermedio, alineado con los extremos. La determinación de este punto intermedio se conoce como *entrada en alineación* y se debe cumplir la condición siguiente: la lectura acimutal desde este punto intermedio a uno de los puntos extremos debe diferenciarse exactamente en 200^g ó 180^o de la lectura acimutal al otro punto extremo. En un caso u otro, situado el goniómetro en uno de los puntos colimamos el otro punto y simplemente cabeceando el anteojo se irán colocando los jalones en los lugares adecuados, empezando por el punto más alejado.

La entrada en alineación puede realizarse mediante tanteos en sucesivos estacionamientos. O, también, desde un punto exterior (P) a la alineación (AB) se pueden medir las distancias (PA y PB) a cada uno de los extremos de dicha alineación y el ángulo comprendido (α). A continuación se resuelve el triángulo formado, con ayuda del teorema del coseno, seguidamente se divide en dos triángulos rectángulos y se calcula sobre estos el ángulo y la distancia a un punto intermedio (H) de la alineación. En cualquiera de los casos se debe cumplir la condición antes indicada de la diferencia angular.

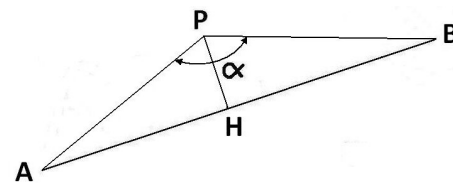


Fig. 17.7. Entrada en alineación

Un elemento que agiliza considerablemente esta labor es un láser, del que están equipadas muchas estaciones totales. Con él la colocación del jalón se verifica en el mismo punto situado, sin necesidad de recibir instrucciones desde el goniómetro, que puede estar situado a gran distancia.

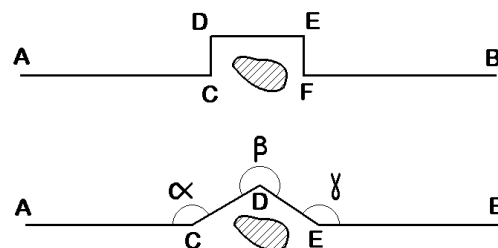


Fig. 17.8. Métodos para salvar los obstáculos

Cuando los puntos extremos de la alineación no sean visibles entre sí replantearemos la alineación realizando un itinerario normal, pero con la premisa a cumplir de que en todas las estaciones intermedias la lectura acimutal de la visual de

espaldas debe diferir exactamente en 200^g ó 180^g de la lectura acimutal de la visual de frente. Así, al llegar al otro punto extremo de la alineación, que está señalado en el terreno, podemos cuantificar el error angular producido en el itinerario y, si este es admisible, compensarlo como ya conocemos.

Si entre los dos puntos extremos de la alineación, A y B , se interpone un obstáculo, lo salvaremos utilizando cualquiera de estos métodos (figura 17.8):

- Partiendo del punto A de la figura replanteamos el punto C , perteneciente a la alineación y próximo al obstáculo; desde éste se levanta una perpendicular hasta el punto D ; a partir de este punto se levanta una nueva línea paralela a la alineación AB y en la dirección del otro punto extremo de la alineación, E . Posteriormente, y desde éste, se materializa una línea perpendicular a la anterior y marcando el punto F , que está de nuevo sobre la alineación inicial AB . Se debe cumplir que la distancia CD sea igual a la distancia EF . Estas perpendiculares se pueden levantar con goniómetro, escuadra de prismas o incluso cinta métrica.
- Partiendo del punto A replanteamos el punto C , perteneciente a la alineación y próximo al obstáculo; desde éste levantamos un punto D que nos permita salvar el obstáculo. Medimos la distancia CD y el ángulo que forma esta visual con la AC y que denominamos α . A continuación, estacionados en D lanzamos la visual DE que forma un ángulo β con la alineación CD . Para materializar el punto E debemos conocer la distancia DE , que calculamos a partir de la expresión:

$$DE = CD \frac{\text{sen}(200 - \alpha)}{\text{sen}[200 - (200 - \alpha) - (400 - \beta)]} = CD \frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}(\alpha + \beta)}$$

Una vez estacionados en E , para recuperar la dirección de la alineación AB debemos llevar, a partir de la alineación DE , el ángulo γ , que obtenemos de la expresión:

$$\gamma = 600^g - \alpha - \beta$$

Repasaremos ahora unos métodos sencillos para el trazado de alineaciones rectas perpendiculares o paralelas a una dada, así como el trazado de bisectrices de dos alineaciones rectas que se cortan.

Alineaciones perpendiculares (figura 17.9)

- Utilizando la relación 3-4-5 se genera un triángulo rectángulo. Con la ayuda de una cinta para la medida de las distancias se trazará el triángulo indicado. Se utiliza para perpendiculares de poca precisión y corta distancia.
- Pueden utilizarse los procesos de construcción de perpendiculares a un punto dado propios del Dibujo. Para realizarlo utilizaremos también la cinta métrica. Se emplean para perpendiculares de poca precisión y corta distancia.

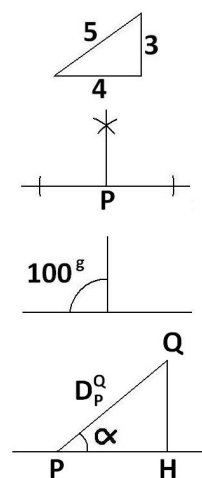


Fig. 17.9. Alineaciones perpendiculares

- Si disponemos de una estación total y podemos estacionar sobre la alineación en el punto desde el que se desea trazar la perpendicular, basta con girar 100^g en horizontal para obtener una perpendicular.
- Si no se puede estacionar en ese punto pero se puede ocupar otro P de la alineación se estaciona en él y a continuación se visa a un punto exterior Q por donde se desea que pase la perpendicular, midiendo la distancia entre esos puntos y el ángulo α formado con la alineación. A continuación se resuelve el triángulo rectángulo formado y se obtiene el punto de la alineación H por donde pasará la perpendicular.

Alineaciones paralelas

- Para trazar una alineación paralela a otra dada es suficiente con trazar dos perpendiculares de la misma longitud, utilizando cualquiera de los métodos antes descritos.
- Otro procedimiento sencillo consiste en estacionar en un punto de la alineación, P , y visar a un segundo punto, Q , por donde debe pasar la paralela, midiendo el ángulo α formado por ambas alineaciones (figura 17.10). A continuación estacionamos en ese segundo punto y, tras visar el primer punto, giramos el ángulo antes medido. En este momento ya estaríamos en una alineación paralela a la primera.

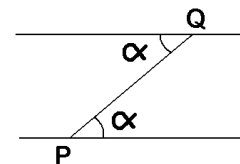


Fig. 17.10. Alineaciones paralelas

Bisectrices

- Si es posible estacionar en el vértice, la solución es inmediata, pues se puede medir el ángulo formado.
- Si no es posible estacionar en el vértice (figura 17.11) deberemos hacerlo en dos puntos A y B , uno en cada alineación, y medir los ángulos α y β formados entre la alineación y el otro punto. Si dispusiésemos de otros dos puntos, C y D , a la misma distancia del vértice, los cuatro formarían un cuadrilátero, cuyos ángulos interiores sumarían 400^g . De aquí se deducirá el ángulo δ a girar para obtener una línea perpendicular a la bisectriz. Midiendo la mitad de la distancia a la otra alineación obtendremos un punto de la bisectriz. Aplicando de nuevo el ángulo calculado en otro lugar de la alineación y repitiendo el proceso obtendremos un segundo punto de la bisectriz.

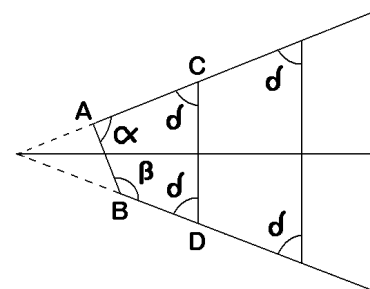


Fig. 17.11. Bisectrices

17.4.- REPLANTEO DE ALINEACIONES CURVAS CIRCULARES

En todo proyecto de ingeniería civil existirán alineaciones rectas o curvas; de todos los puntos extremos de estas alineaciones debemos conocer sus coordenadas para plasmarlos en el terreno. En primer lugar se deben replantear las alineaciones rectas y posteriormente ajustar a éstas las alineaciones curvas.

En este apartado estudiaremos solamente las alineaciones curvas circulares, en posteriores apartados veremos otros tipos de curvas.

En cualquier caso, el replanteo de una curva consiste en determinar la posición de todos los puntos de interés que formen parte de esa curva, con el fin de materializarlos también sobre el terreno.

A continuación describimos los puntos fundamentales de estas curvas y que son necesarios para su replanteo (figura 17.12):

Denominamos *punto de entrada (A)* y *punto de salida (B)* de la curva a los puntos de tangencia entre la alineación recta anterior y la curva y entre la alineación recta posterior y la misma curva.

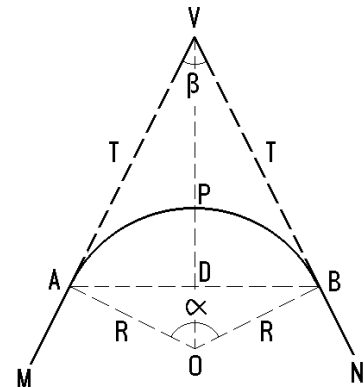


Fig. 17.12. Elementos de una curva circular (1)

Vértice (V) es el punto donde se unirían ambas alineaciones rectas si estas se prolongasen.

Tangente de entrada y tangente de salida (T) es la distancia entre, respectivamente, el punto de entrada y el vértice y entre el punto de salida y el mismo vértice. En el caso de curvas circulares, ambas tangentes son iguales.

Existe una serie de expresiones que nos permite, en este caso, calcular los valores de los distintos parámetros de la curva y que nos serán de utilidad, posteriormente, para aplicar distintos métodos de replanteo.

Las tangentes de entrada y salida serán:

$$T = R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = R \operatorname{cotg} \frac{\beta}{2}$$

La cuerda entre los puntos A y B la podemos obtener de las expresiones siguientes:

$$AB = 2 R \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} = 2 T \operatorname{sen} \frac{\beta}{2}$$

La cuerda entre los puntos A y P o entre B y P valdrá:

$$AP = BP = 2 R \operatorname{sen} \frac{\alpha}{4}$$

De la misma manera podemos obtener el valor de otros puntos de interés de la curva, tan solo variando el valor del ángulo.

La flecha del arco, PD, será:

$$PD = R - R \cos \frac{\alpha}{2} = 2 R \operatorname{sen}^2 \frac{\alpha}{4}$$

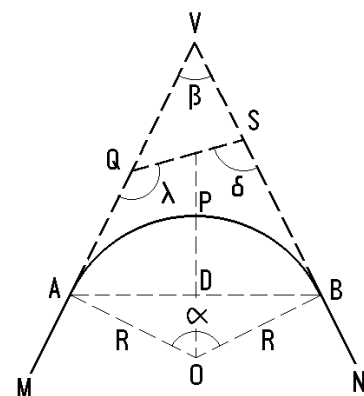


Fig. 17.13. Elementos de una curva circular (2)

La longitud del arco de curva AB será:

$$A-B = 2\pi R \frac{\alpha}{400^g} = \pi R \frac{\alpha}{200^g}$$

En algunas ocasiones, por necesidades del replanteo, se debe estacionar en el vértice V, pero debido a la topografía de la zona puede resultar imposible. En estos casos se definen dos puntos, Q y S, sobre la tangente de entrada y salida respectivamente (figura 17.13). La alineación definida por estos puntos, de la que calculamos su longitud, forma con las tangentes de entrada y salida los ángulos λ y δ . Resolviendo el triángulo VQS podemos obtener el valor del ángulo β , que será:

$$\beta = \lambda + \delta - 200^g$$

La distancia de cada uno de estos puntos al vértice V viene dada por las expresiones siguientes:

$$VQ = \frac{QS}{\text{sen } \beta} \text{sen } (\pi - \delta) \quad VS = \frac{QS}{\text{sen } \beta} \text{sen } (\pi - \lambda)$$

A partir de este punto ya es posible calcular todos los parámetros necesarios para el replanteo de la curva.

Puede suceder que los puntos Q y S no sean visibles entre si o no se pueda calcular directamente la distancia entre ellos; en estos casos realizaremos un itinerario, del menor número de tramos posibles, entre ellos con el fin de obtener la distancia y los ángulos.

17.4.1.- Método de abscisas y ordenadas sobre la tangente

Para aplicar este método utilizamos como eje de abscisas (X) la tangente de entrada o de salida, y como eje de ordenadas (Y) el radio, perpendicular a ella. Como origen utilizamos el punto de entrada o el de salida.

A continuación debemos dividir en un número par de partes iguales el ángulo α , que es el formado en el centro de la circunferencia O, y limitado por los radios, R, que unen este punto con los de entrada y salida de la curva. A cada uno de estos valores angulares lo denominamos γ (figura 17.14).

Las expresiones que permiten calcular las coordenadas de cada punto son:

$$X = R \text{sen } \gamma$$

$$Y = R - R \cos \gamma = 2 R \text{sen}^2 \frac{\gamma}{2}$$

Para determinar las coordenadas de los siguientes puntos basta introducir, en las expresiones anteriores, dos veces el ángulo γ para el segundo punto, tres veces para el tercero, etc. Es frecuente replantear la mitad de la curva desde cada una de las tangentes y comprobar que se llega al mismo punto central.

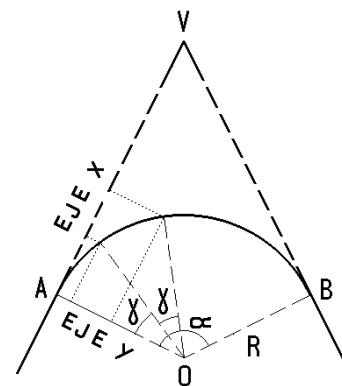


Fig. 17.14. Método de abscisas y ordenadas sobre la tangente

Si la curva es relativamente pequeña, su replanteo puede realizarse simplemente con ayuda de una escuadra y cinta métrica.

17.4.2.- Método de coordenadas polares

Se basa este método en que una cuerda, de una distancia constante, medida sobre la curva es subtendida siempre por el mismo arco. Para aplicarlo, definimos una distancia y calculamos el ángulo $\gamma = AOP$, que viene dado por la expresión:

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

El método operativo es el siguiente: estacionamos el goniómetro en el punto de entrada de la curva y hacemos coincidir el cero del limbo acimutal con la dirección de la tangente de entrada; a continuación llevamos sobre el limbo el ángulo $\gamma/2$ obtenido anteriormente. Situamos el extremo de una cinta métrica en el punto de entrada y, midiendo con ésta la distancia l , en el punto en que el extremo de ésta quede perfectamente alineado con la visual marcamos el primer punto de la curva (figura 17.15). Para materializar el segundo punto buscamos sobre el limbo el ángulo γ , situando ahora el extremo de la cinta métrica en el primer punto hallado, hacemos que coincida de nuevo el extremo de ésta con la visual que tenemos en este momento en el goniómetro y en este instante marcamos el segundo punto de la alineación. Repetimos la operación cuantas veces sea necesario.

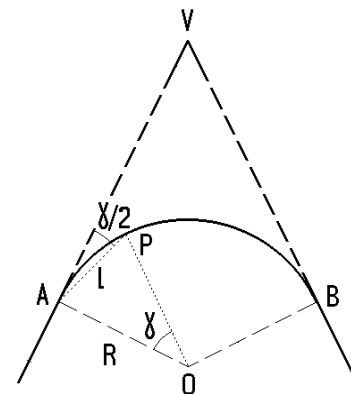


Fig. 17.15. Método de coordenadas polares

Utilizando distanciómetros electrónicos, basta fijar el ángulo γ y trasladar el prisma sobre esa línea hasta obtener la distancia deseada.

Si en un momento determinado deja de ser visible el punto, podemos trasladar el goniómetro al último punto replanteado y volver a iniciar el procedimiento con la misma distancia y el mismo ángulo. Se aconseja replantear la mitad de la curva desde el punto de entrada y la otra mitad desde el de salida.

17.4.3.- Método de ángulos inscritos

Este método se utilizará en terrenos despejados, de manera que toda la curva sea visible desde los puntos de entrada y salida de la misma. Estacionamos un goniómetro en cada uno de dichos puntos y hacemos coincidir, en ambos casos, el cero del limbo acimutal con la tangente correspondiente (figura 17.16).

Si lanzamos visuales con ambos goniómetros sobre un mismo punto de la curva P obtendríamos que los ángulos formados por dichas alineaciones y las tangentes, γ y δ respectivamente, adoptan los siguientes valores:

$$\gamma = A\hat{O}P/2 \quad \delta = B\hat{O}P/2$$

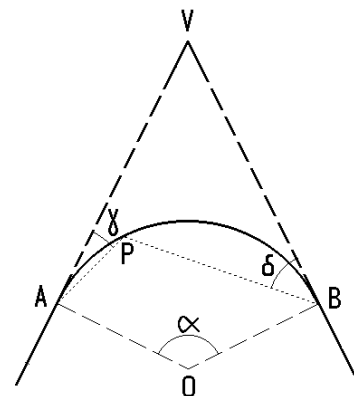


Fig. 17.16. Método de ángulos inscritos

puesto que son ángulos semi-inscritos en la circunferencia. Si los sumamos, obtenemos:

$$\gamma + \delta = (A\hat{O}P + B\hat{O}P)/2 = A\hat{O}B/2 = \alpha/2$$

Por esto, para obtener todos los puntos deseados de la curva basta con medir en los goniómetros pares de ángulos cuya suma sea la mitad del ángulo α . Para replantar un punto, se desplaza un jalón hasta que quede simultáneamente colimado por los dos goniómetros.

Si lo que deseamos es obtener puntos equivalentes a una distancia dada l basta aplicar la expresión utilizada en el apartado anterior.

$$\text{sen } \gamma_1 = \frac{l}{2R}$$

y calcular, a partir de este ángulo hallado, el ángulo δ_1 correspondiente. Para el resto de los puntos es suficiente sumar y restar respectivamente el mismo ángulo hallado (γ_1) a los ángulos γ_1 y δ_1 para obtener los nuevos γ_2 y δ_2 .

17.4.4.- Método de polígonos circunscritos

Utilizaremos este método en lugares donde el espacio en torno a la curva a replantar sea muy restringido (trincheras, túneles, etc.) lo que limitará la visibilidad y nos obligará a cambiar de estación con cada nuevo punto que se replantee. Por ello su precisión es inferior a la de otros métodos, debido a la transmisión y, por tanto, acumulación de los errores.

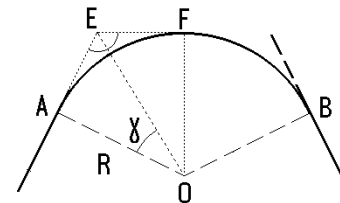


Fig. 17.17. Método de polígonos circunscritos

Consiste en estacionar un taquímetro o una estación total en el punto de entrada de la curva y prolongar la tangente de entrada hasta un punto E , próximo a la pared pero que permita estacionar de nuevo el instrumento. Calculamos la distancia AE y determinamos el valor del ángulo $AOE = \gamma$.

$$A\hat{O}E = \gamma = \text{arc tg } \frac{AE}{R}$$

A continuación estacionamos en E y llevamos el ángulo AEF y que viene dado por la expresión (figura 17.17):

$$A\hat{E}F = 200^g - 2\gamma$$

y marcamos sobre esta alineación la distancia AE , con lo que materializamos el punto F , que forma parte de la curva. Para el siguiente punto, estacionamos en F , prolongamos la alineación EF y repetimos la operación anteriormente descrita.

17.4.5.- Método de polígonos inscritos

Se utiliza este método, al igual que el anterior, en el replanteo de curvas en trincheras, túneles, etc. La diferencia es que, en este caso, todos los puntos en los que estacionamos el goniómetro son puntos de la curva a replantar.

Para aplicarlo, adoptamos una longitud de cuerda apropiada, l , y que podamos medir fácilmente y calculamos el ángulo $AOC = \gamma$ y mediante la expresión ya conocida:

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

Estacionamos el goniómetro en el punto de entrada de la curva, A , y determinamos la dirección de la visual al primer punto, C , de manera que el ángulo $VAC = \gamma/2$. Como en métodos anteriores, en el punto donde coincida la cuerda de longitud l con esta visual se marca el punto C (figura 17.18). Si el siguiente punto a replantear, D , ya no es visible desde A , estacionamos el goniómetro en el punto C y, para determinar la dirección, materializamos el ángulo $ACD = 200^g - \gamma$; sobre esta dirección llevamos l y obtenemos el punto D . Repetiremos este último paso para replantear la posición del resto de los puntos de la curva.

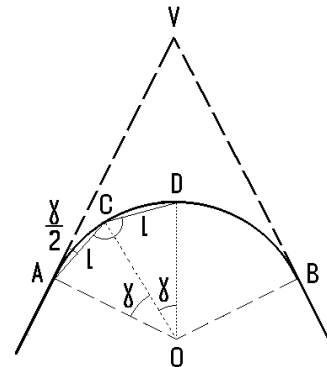
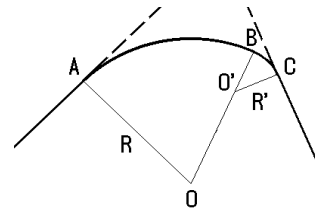


Fig. 17.18. Método de polígonos inscritos

17.4.6.- Replanteo de curvas circulares compuestas

A veces, por características del proyecto o del terreno, puede ser necesario unir dos alineaciones rectas con una alineación curva, pero formada ésta a su vez por arcos de curvas de distintos radios, lo que se denomina *arco compuesto* (figura 17.19).



En este caso el problema admite distintas soluciones, entre las que se elegirá la más adecuada. Este arco compuesto puede contener, o no, puntos de inflexión, como en los ejemplos de la figura. A continuación se calcula sobre proyecto el centro de cada una de las curvas circulares que lo componen, así como sus tangentes y puntos de unión entre curvas sucesivas.

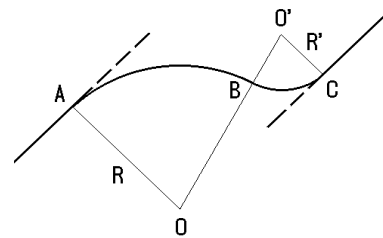


Fig. 17.19. Curvas circulares compuestas

Para proceder a su replanteo elegimos el método, de entre los expuestos anteriormente, más idóneo y replanteamos cada curva individualmente.

17.5.- REPLANTEO DE ALINEACIONES CURVAS NO CIRCULARES

En muchas ocasiones, la naturaleza del proyecto obliga al replanteo de curvas no circulares para la unión de tramos rectos o curvos. En estos casos, y sobre todo en proyectos de vías de comunicación, se utiliza un tipo de curva denominado *clotoide*. En este tipo de curvas, el radio de curvatura varía de forma inversamente proporcional a la longitud de arco recorrido. Por esto, su ecuación intrínseca es:

$$A^2 = L R$$

donde: A^2 = parámetro de la curva, que se mantiene constante
 L = longitud de la curva
 R = radio de la curva

Se utiliza esta curva para conseguir la marcha cómoda de un vehículo entre dos puntos del trazado de radio diferente. En función de la velocidad que se desee y del tipo de vehículo, se utilizará un valor u otro para el parámetro A^2 .

Se intercala la clotoide entre rectas, radio infinito, y curvas circulares, o entre dos curvas circulares de radio diferente. Se opera siempre desde el punto de radio mayor al de radio menor.

La nomenclatura de los distintos elementos de una clotoide es la siguiente (figura 17.20):

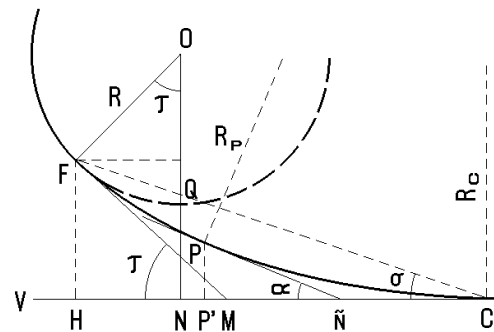


Fig. 17.20. Replanteo de clotoides (1)

- $C =$ punto inicial de la clotoide
- $F =$ punto final de la clotoide
- $P =$ punto cualquiera de la clotoide
- $O =$ centro del arco circular con el que enlaza la clotoide
- $R =$ radio del arco circular en el punto F
- $R_C =$ radio de la clotoide en el punto C
- $R_P =$ radio de la clotoide en el punto P
- $L_P =$ longitud del arco de clotoide entre los puntos C y P
- $L =$ longitud del arco de la clotoide entre los puntos C y F
- $T_C = (FM)$ Tangente corta en F
- $T_L = (CM)$ Tangente larga en C
- $T_P = (PÑ)$ Tangente en P
- $S_L = (CF)$ Cuerda de la clotoide
- $\tau = (FMV)$ o (FON) Angulo de la tangente FM con la prolongación de la alineación recta
- $\sigma = (FCV)$ Angulo polar de F
- $\alpha = (PÑV)$ Angulo de la tangente en el punto P con la prolongación de la alineación recta
- $\Delta R = (NQ)$ Incremento del radio circular o retranqueo
- $r =$ número de grados centesimales de un radián = 636.620^g

Las expresiones para el cálculo de los diferentes parámetros son las siguientes:

$$X_C^F = L - \frac{L^5}{10(2A^2)^2} + \frac{L^9}{216(2A^2)^4} - \frac{L^{13}}{9360(2A^2)^6}$$

$$Y_C^F = \frac{L^3}{3(2A^2)} - \frac{L^7}{42(2A^2)^3} + \frac{L^{11}}{1320(2A^2)^5} - \frac{L^{15}}{75600(2A^2)^7}$$

$$\tau = r \frac{L}{2R}$$

$$\sigma = \text{arc tg} \frac{Y_C^F}{X_C^F}$$

$$S_L = CF = \sqrt{(X_C^F)^2 - (Y_C^F)^2}$$

$$T_L = CM = CH - HM = X_C^F - Y_C^F \cotg \tau$$

$$T_C = FM = \frac{Y_C^F}{\text{sen } \tau}$$

$$\Delta R = NQ = Y_C^O - R$$

$$X_C^O = CN = CH - HN = X_C^F - R \text{ sen } \tau$$

$$Y_C^O = NO = Y_C^F + R \text{ cos } \tau$$

Para calcular las coordenadas absolutas del punto O , centro del arco circular, determinamos, a partir de dos puntos de coordenadas conocidas y situados sobre las alineaciones rectas anterior y posterior a la curva, las coordenadas de dos puntos de apoyo, A' y B' , exteriores a la alineación pero a una distancia de esta igual a la distancia del punto O a cada una de las alineaciones rectas, una vez prolongadas (figura 17.21).

$$X_{A'} = X_A + Y_C^O \text{ sen } \theta_A^{A'}$$

$$Y_{A'} = Y_A + Y_C^O \text{ cos } \theta_A^{A'}$$

De igual manera se calculan las coordenadas absolutas del punto B' . Los acimutes de las alineaciones AA' y BB' se obtienen a partir de los acimutes de las alineaciones rectas sumando o restando a estos 100° ó 90° .

Una vez conocidas éstas y los acimutes de las alineaciones $A'O$ y $B'O$, iguales a los acimutes de las alineaciones rectas, se resuelve el triángulo resultante y se obtienen las coordenadas absolutas del punto O .

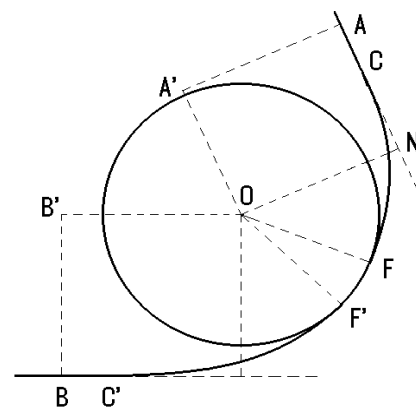


Fig. 17.21. Replanteo de clotoides (2)

Las coordenadas absolutas del punto C de la clotoide se pueden obtener a partir de las coordenadas absolutas de O , a través de las alineaciones ON y NC , aplicando:

$$X_C = X_O + Y_C^O \text{ sen } \theta_O^N + X_C^O \text{ sen } \theta_N^C$$

$$Y_C = Y_O + Y_C^O \text{ cos } \theta_O^N + X_C^O \text{ cos } \theta_N^C$$

Las coordenadas absolutas del punto F se obtienen a partir de las que acabamos de calcular para C , mediante las expresiones:

$$X_F = X_C + S_L \text{ sen } (\theta_C^N \pm \sigma)$$

$$Y_F = Y_C + S_L \text{ cos } (\theta_C^N \pm \sigma)$$

En cada caso, en función de la posición de las alineaciones, se sumará o restará el ángulo σ para obtener el acimut de la alineación CF .

Las coordenadas absolutas de cualquier punto P de la clotoide se obtendrán a partir de las coordenadas absolutas del punto C y conocidas sus respectivas coordenadas parciales, calculadas anteriormente.

Una vez conocidas las coordenadas, utilizaremos cualquiera de los métodos de replanteo ya estudiados para materializar los puntos de interés sobre el terreno.

17.6.- REPLANTEO ALTIMÉTRICO.

Todos los métodos anteriormente descritos los utilizaremos para el replanteo planimétrico de los puntos del proyecto en planta, pero también es necesario replantear la rasante de ese proyecto. Por esto, en cada punto replanteado debemos conocer e indicar la distancia que debemos subir, si se trata de un terraplén, o bajar, si se trata de un desmonte, para alcanzar la cota definitiva de la rasante. Los puntos deben estar convenientemente distribuidos para indicar fielmente la altimetría de la explanación. Estos datos los obtenemos del proyecto.

Es necesario, para ejecutar el replanteo altimétrico, disponer de una *red de apoyo altimétrica*, que suele coincidir con la planimétrica, aunque en algunos casos se deben situar bases de replanteo específicamente altimétricas. La precisión con que debe ser calculado el valor de Z depende de la precisión exigida a los puntos replanteados desde ellas, pero normalmente siempre se medirán mediante nivelación geométrica. Aquí también es válido lo comentado anteriormente respecto a la existencia de redes primarias y secundarias.

El replanteo de la altimetría de los puntos del proyecto se realizará con nivel o con estación total, dependiendo de la precisión exigida, de la ubicación del punto, etc. Es bastante habitual que se utilice una estación total para la posición planimétrica y un nivel para la altimétrica. Los elementos de señalización a utilizar serán estacas, piquetas, clavos, etc., dependiendo de la finalidad y situación del punto replanteado, del tiempo que deba permanecer, etc. En muchos casos el punto altimétrico se desplaza una distancia constante de su ubicación real, para que sirva de referencia durante parte de la obra, situándose en su posición final en el *refino de la rasante* (proceso de ajuste fino de la altura de la rasante).

Cambios de rasante. Transiciones.

La pendiente de la rasante debe responder a la finalidad de la obra proyectada. En el caso de carreteras, ferrocarriles, etc., debe cumplir la normativa oficial. En los perfiles transversales también debe tenerse en cuenta el *peralte*, que es la pendiente transversal que en las curvas disminuye el efecto de la fuerza centrífuga.

Entre los tramos de rasante de pendiente distinta debemos replantear una *curva de acuerdo vertical*, para evitar el paso brusco de una pendiente a otra. Estas curvas pueden ser cóncavas o convexas y generalmente tienen forma parabólica.

La expresión que utilizamos para el cálculo de la ordenada vertical, h , entre un punto P considerado y la continuación de la rasante sería:

$$h = \frac{[p - (-q)] l^2}{400 L} = \frac{(p + q) l^2}{400 L}$$

donde: p = pendiente, en %, entre los puntos A y B
 q = pendiente, en %, entre los puntos B y C

Los términos p y q deben estar afectados por el signo, siendo positivos si en terreno es ascendente, rampa, o negativos si el terreno es descendente, pendiente. La expresión anterior corresponde al caso de la figura 17.22. Si en algún caso el valor de esta suma o diferencia adopta un valor negativo, prescindiremos del signo para el cálculo de h .

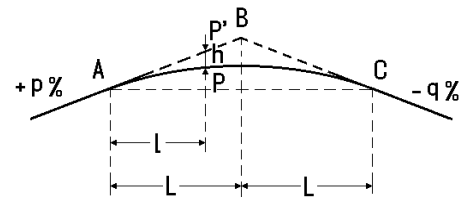


Fig. 17.22. Replanteo de rasantes

En el caso de la figura, la Z_A^P se calcula fácilmente restando de la $Z_A^{P'}$ (que se calcula a partir de la distancia l y de la pendiente) la ordenada vertical h , como se observa en la siguiente expresión:

$$Z_A^P = Z_A^{P'} - h = \frac{p}{100} l - h$$

De igual modo, también existen *transiciones de peraltes*, desde peralte 0 en tramos rectos hasta el valor del peralte indicado por la norma en función del radio de la curva y de la velocidad de la vía.

18. CONTROL DE MOVIMIENTOS DE ESTRUCTURAS Y OBRAS DE TIERRA

18.1.- INTRODUCCIÓN

El control de movimientos de estructuras (puentes, presas, edificaciones) y obras de tierra (taludes, laderas) requiere la medición precisa de los posibles cambios de posición de una serie de puntos, bien elegidos y marcados sobre la obra a controlar. Los métodos topográficos de control son sólo una parte del conjunto de métodos disponibles. Se emplean también equipos como extensómetros, deformómetros, elongómetros, etc., a menudo en combinación con los métodos topográficos. Aquí sólo nos ocuparemos de estos últimos.

Los movimientos que se producen en las obras civiles pueden ser de dos tipos:

- Deformaciones: Son movimientos relativos de una parte de la obra respecto al resto. Ejemplo: convergencia entre las paredes de un túnel.
- Desplazamientos: Movimientos absolutos de toda la obra.

Tanto unas como otros suelen tener valores pequeños (hasta unos centímetros) y producirse a lo largo de periodos de tiempo de duración considerable (a menudo, varios años).

El control de estos movimientos supone, por tanto, emplear instrumentos y métodos capaces de aportar precisiones compatibles con las necesidades de estos trabajos. Hay que tener en cuenta que las diferencias encontradas en la posición de un punto en dos mediciones distintas no se considerarán desplazamiento si están dentro del margen de incertidumbre de las observaciones. Si este margen es excesivamente grande, no seremos capaces de determinar si la diferencia es un desplazamiento importante o se trata sólo de los errores accidentales propios de la medición.

Es conveniente realizar un estudio de errores a priori que nos permita seleccionar los métodos e instrumentos más apropiados para cada situación concreta e incluso, dentro de lo posible, elegir adecuadamente los puntos de estación y las referencias de forma que se minimicen los errores accidentales. Los errores accidentales dependen, como sabemos, de las características del instrumento topográfico a emplear y del método topográfico a aplicar.

Las observaciones pueden hacerse de forma sistemática, es decir repitiéndolas cada cierto tiempo para comprobar la posible existencia de desplazamientos y su evolución. Pero hay factores variables (entre los que están los terremotos y determinadas acciones meteorológicas) que, caso de suceder, requieren realizar mediciones de forma inmediata para evaluar sus posibles efectos.

Es habitual realizar las mediciones sobre varios puntos de control distribuidos

a lo largo de toda la obra a controlar. De esta forma, se pueden relacionar los posibles movimientos de distintas partes de ésta o del conjunto respecto al terreno que la rodea.

18.2.- INFRAESTRUCTURA TOPOGRÁFICA

Las observaciones se realizan desde una serie de puntos de estación y con ayuda de referencias. Las condiciones a cumplir son las siguientes:

- Los puntos de estación deben estar situados en ubicaciones que no puedan verse afectadas en caso de movimientos que afecten a la obra.
- Debe disponerse de referencias exteriores, suficientemente alejadas de la posible zona de afección, para, a partir de ellas, poder comprobar con garantías que los puntos de estación no se han movido.
- El número de puntos de estación debe ser suficiente para realizar mediciones sobreabundantes, que permitan comprobarlas.
- La red de puntos que constituirán la infraestructura topográfica se medirá con métodos e instrumentos que permitan obtener precisiones compatibles con las necesidades del trabajo.
- Se emplearán puntos de estación permanentes y sistemas para reducir los errores accidentales, como el centrado forzado.
- Los puntos a controlar en la obra también suelen estar marcados con señales permanentes que permitan realizar una buena puntería.

La red de vértices puede levantarse por triangulación/trilateración o empleando técnicas GPS. Las características de la obra a controlar pueden hacer recomendable el levantamiento de nuevos vértices, independientes de los que se emplearon durante el proceso de diseño y construcción de la obra.

Si se aplica una red levantada por triangulación o por trilateración, se emplearán, al menos, cuatro vértices, de forma que se puedan realizar intersecciones múltiples que permitan comprobar los resultados y, en su caso, rechazar las posibles observaciones defectuosas. El ajuste de las observaciones se realizará por el método de mínimos cuadrados, tal como se estudió en el capítulo 15. La ubicación de los vértices se elegirá, dentro de lo posible, de forma que se minimicen los errores accidentales de la red y los de las futuras mediciones de los puntos de control de la obra.

Las mediciones, incluida la de la base, se realizan con toda la precisión disponible. En las mediciones de distancias deben determinarse las condiciones de la medición (temperatura, etc.) para introducir las correcciones correspondientes. En las mediciones angulares se emplea el método de las series, realizando de cuatro a seis series, o el de los pares sobre una referencia. Se repetirán todas las mediciones de cualquier vuelta de horizonte con un error de cierre superior a:

$$\sqrt{2} \sqrt{e_p^2 + e_l^2}$$

siendo e_p y e_l los errores de puntería y de lectura que se habían calculado a priori.

18.2.1.- Características de la red de control

Como se ha indicado, los puntos de estación se eligen en zonas que no vayan a verse afectadas por los posibles movimientos de la obra. Su permanencia se

comprueba a partir de una serie de referencias, visibles desde las estaciones, marcadas de forma permanente y suficientemente alejadas de la obra.

Los puntos de estación también suelen marcarse de forma permanente. Para minimizar la influencia del error de dirección, facilitando además la puesta en estación, se emplea el centrado forzado. Para ello, cada punto se marca mediante un pilar de hormigón armado rematado por una placa metálica fija, con un tornillo del mismo paso que el de la base del instrumento a emplear. Para situar el instrumento basta con fijarlo a este tornillo, lo que garantiza que la puesta en estación se hace siempre exactamente sobre el mismo punto. El pilar de hormigón se sitúa sobre terreno estable. Con frecuencia se instala dentro de una caseta de obra, que se construye con ventanas orientadas hacia los puntos a los que se van a lanzar visuales.

Los puntos de control se sitúan sobre la estructura, bien distribuidos. Suelen marcarse de forma permanente, empleando dianas con un punto de 1 a 2mm en su centro.

La red compuesta por las estaciones y los puntos de control se habrá diseñado para que las longitudes de las visuales correspondan a errores a priori suficientemente reducidos. Los valores que adoptan los errores accidentales suelen aumentar con la longitud de la visual. Una excepción es el error de dirección, que es proporcional a la inversa de la longitud, pero que ya queda limitado al trabajar mediante centrado forzado.

18.3.- MÉTODOS TOPOGRÁFICOS EMPLEADOS

La diferencia en la posición de un punto, calculada en dos controles consecutivos, nos dará el correspondiente vector desplazamiento. Para ver si esa diferencia es significativa debemos compararla con el error a priori propio de la medición.

Supongamos un punto de control, levantado por intersección directa, para el que la primera medición dio como resultado una posición V y la segunda, realizada un tiempo después, una posición V' . Si las elipses de error centradas en V y V' (figura 18.1) se cortan, quiere decir que el margen de incertidumbre propio de la medición es mayor que la diferencia observada. Por tanto, ésta no se considerará significativa.

Por el contrario, si la diferencia es tan grande que las elipses de error no llegan a tocarse (figura 18.2) se considerará que es significativa y que se ha producido un movimiento del punto de control.

En cada uno de los métodos que se explican a continuación se tendrán en cuenta los errores máximos accidentales calculados a priori y se aplicará el mismo criterio.

18.3.1.- Intersección directa mediante observaciones angulares

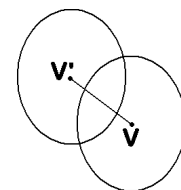


Fig. 18.1.
Diferencia no significativa

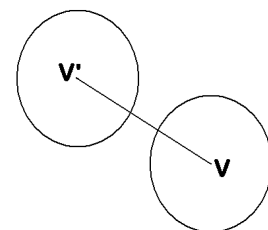


Fig. 18.2.
Diferencia significativa

Los puntos de control (como el P de la figura 18.3) se visan desde los vértices previamente establecidos. En el caso de observaciones angulares, pueden emplearse los mismos métodos para aumentar la precisión que se emplearon en la triangulación: método de las series o método de los pares sobre una referencia.

Se realizan mediciones sobreabundantes, resolviendo más de un triángulo y calculando la posición de P por varios caminos. Es conveniente rechazar aquellas configuraciones que den lugar a triángulos con el ángulo de intersección muy forzado (mayor de 175^g o menor de 25^g) como podría ser el caso de los vértices $V3$ y $V4$ y el punto P de la figura 18.3.

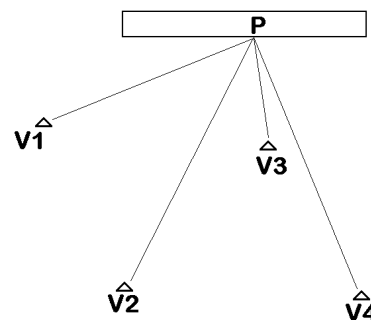


Fig. 18.3. Intersección directa

18.3.2.- Intersección directa mediante observaciones de distancias

En ocasiones, si los errores a priori lo justifican, se opta por realizar el control mediante trilateración topográfica, es decir midiendo los lados de los triángulos formados entre dos vértices y un punto de control. Las señales fijadas en la obra deben ser susceptibles de situar un prisma de reflexión total, de forma que se asegure el centrado forzado del mismo. También puede emplearse una estación total láser, sin prisma, y trabajar con señales similares a las que se describen en 18.2.1.

Para que las mediciones sean lo más precisas posible, se introducen todas las correcciones pertinentes (temperatura, constante de prisma, etc.). Como sabemos, las distancias deben ser reducidas al horizonte. Los errores accidentales a considerar serán los propios de la medición electrónica de distancias.

18.3.3.- Itinerario de precisión

El método de poligonación puede aplicarse cuando los puntos de control no sean visibles desde los vértices de la triangulación. Esto puede suceder en el caso de terrenos muy accidentados y, especialmente, en el de obras subterráneas, galerías interiores de presas, etc.

Las estaciones estarán dotadas de sistemas de centrado forzado, por las razones antes expuestas, para el instrumento y las señales de puntería. Para la medición de ángulos horizontales se utilizan señales de puntería más precisas que el prisma, como los conos de puntería y las esferas de puntería. Además, es una práctica recomendable duplicar las observaciones aplicando la regla de Bessel.

Para poder detectar desplazamientos, al menos las estaciones extremas deben situarse fuera de la zona potencialmente afectada por los movimientos. Además, se debe contar con referencias que permitan comprobar su posición.

18.3.4.- Observación de ángulos

Consiste en medir, desde una estación fija, el ángulo horizontal formado por las visuales al punto de control y a una referencia exterior. Para confirmar que el

punto de estación no se ha desplazado, conviene utilizar dos referencias, comprobando que el ángulo interior se conserva. La figura 18.4 muestra la aplicación del método a los puntos de control P1 a P5.

Las observaciones se realizan aplicando los métodos para aumentar la precisión a que nos hemos referido anteriormente. Con este método pueden detectarse movimientos en sentido transversal a la dirección de la visual.

Los errores a considerar son los propios de la medida de ángulos horizontales, teniendo en cuenta que en la determinación de un ángulo interior intervienen dos visuales. Por tanto, el error calculado a priori se multiplica por $\sqrt{2}$.

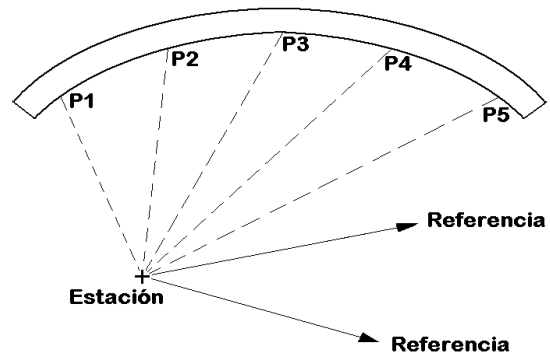


Fig. 18.4. Observación de ángulos

18.3.5.- Radiación

En el control de grandes taludes se emplea, en ocasiones, el método de radiación, a veces con una estación total robotizada. Ésta se mantiene estacionada en un punto fijo situado en una zona que no pueda verse afectada por los posibles movimientos del talud y dentro de una caseta. Visa a un prisma fijo, anclado en el talud, y es capaz de moverse, en horizontal y en vertical, si no recibe la señal reflejada en el prisma. Si el movimiento realizado supera un determinado margen y el prisma no ha sido localizado, se envía un aviso a los responsables.

Puede emplearse una estación total sin prisma y marcar el punto de control con señales como las descritas en 18.2.1.

18.3.6.- Colimación

Se emplea una serie de señales, consistente en reglillas graduadas que pueden desplazarse horizontalmente. Las señales se colocan en la coronación de la obra a controlar y se alinean, con ayuda de un anteojo estacionado en un punto de estación con centrado forzado.

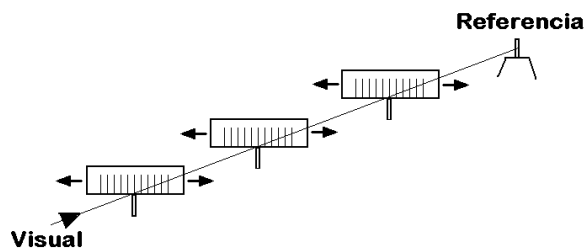


Fig. 18.5. Método de colimación

La alineación sigue la dirección de una visual materializada por una referencia, también fija. Tanto el punto de estación como la referencia se sitúan en zonas no afectadas por los posibles movimientos de la obra. Las reglillas se alinean con ayuda de los tornillos micrométricos de que van provistas, que sirven también para cuantificar posibles desplazamientos o deformaciones en sentido transversal a la visual.

18.3.7.- Nivelación de precisión

Para controlar los movimientos en Z se realizan itinerarios altimétricos mediante nivelación geométrica, apoyados en puntos fijos suficientemente alejados de la zona a controlar. Se emplea el método del punto medio. Las observaciones se realizan sobre puntos fijos de la obra, normalmente marcados por clavos.

18.3.8.- Fotogrametría terrestre

En determinadas obras, por ejemplo grandes taludes, se puede emplear la fotogrametría terrestre como complemento a alguno de los métodos anteriores. Su ventaja radica en que permite levantar fotogramétricamente toda la obra afectada, y no sólo unos pocos puntos, lo que servirá para analizar las posibles causas de un desplazamiento importante de ésta y cuantificar sus efectos.