

CAPÍTULO X

Estudio del movimiento y compensación de tierras.

§ 147. **Compensación longitudinal.**— Utilización del perfil de las áreas.— Construído según indicamos anteriormente el perfil de las áreas y efectuada su compensación transversal, se determinarán los vo-

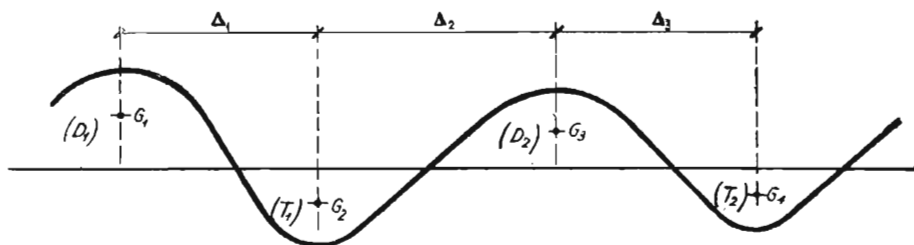


Figura 128.

lúmenes de tierras, de desmonte y terraplén, que habrá que compensar longitudinalmente. Los volúmenes de una y otra clase vendrán dados (fig. 128) por las áreas D_1, D_2, \dots y $T_1, T_2, \text{etc.}$; el desmonte, D_1 , se podrá compensar con un volumen igual, T_1 , de terraplén, transportando las tierras a una distancia media, Δ_1 ; la determinación de cada una de las compensaciones posibles por este procedimiento, lleva consigo la necesidad de las siguientes operaciones: determinación del área, D_1 , que medirá el volumen de tierras disponible; determinación de un área equivalente, T_1 , de terraplén y de su centro de gravedad; la distancia entre ambos centros de gravedad será la del transporte a efectuar; puede ocurrir que las áreas se compensen totalmente, pero puede suceder, y sucede normalmente, que haya tramos de perfil en los cuales sobren tierras que habrá que llevar a “caballeros”, y otros, en los cuales faltan y haya que tomarlas de “préstamos”; y puede haber casos en los que no resulte económica la com-

pensación, y sea más conveniente que hacerla, excavar tierra de préstamos para los terraplenes y, en cambio, depositar en caballeros el sobrante de desmontes determinados.

Efectuar el estudio en la forma indicada, resulta largo y pesado; los volúmenes compensables hay que determinarlos midiendo las áreas, y hay que obtener, además, sus centros de gravedad; cada tanteo implica varias operaciones. Por ello, se recurre a métodos con los que se puede operar mucho más rápidamente, haciendo posible en la práctica la realización de todos los tanteos necesarios, para llegar a la solución más conveniente.

148. Método de Bruckner. - El método del alemán BRUCKNER se reduce a determinar gráficamente la integral de la curva de las áreas, o sea la curva de los volúmenes, que permite hacer rápidamente y sin la menor dificultad, los tanteos precisos para fijar cuáles son las compensaciones económicamente convenientes y sus distancias medias de transporte.

Como el método de BRUCKNER solamente se refiere a la compensación longitudinal, antes de integrar la curva de las áreas, se debe proceder a eliminar de ésta los volúmenes que se han de emplear en la compensación transversal. Habrá también que eliminar de la curva de volúmenes, todas aquellas tierras que, por su naturaleza, no sean apropiadas para la formación de terraplenes; es decir, que la integración debe limitarse a la curva de tierras utilizables para la compensación longitudinal.

De la curva de las áreas de la figura 125 (1) se deducen los volúmenes de tierra que pueden compensarse transversalmente; resulta así la curva *abcdefgh* de la figura 129. Por un punto cualquiera se traza una vertical, *a'₁ g'₁*, y a ella referimos los puntos *a₁, b₁, c₁, ...*, en que las verticales medias entre dos perfiles consecutivos cortan a la línea de las áreas; tomando un polo, (*O*), se construye el funicular correspondiente a partir de un punto arbitrario cualquiera, *A*, en la vertical al del primer perfil; la línea *AB'C'D' ...* se llama línea de los volúmenes, y una ordenada cualquiera de ella representa la suma algebraica de volúmenes de desmonte (con signo \pm) y terraplenes (con signo \rightarrow) hasta el perfil considerado, medida en la base $OM = L$. En efecto, los dos triángulos, *OMa'₁* y *ABB'*, son semejantes, y se tiene:

$$\frac{OM}{Ma'_1} = \frac{AB}{BB'} ; OM = L ; L \times BB' = Ma'_1 \times AB = Ma'_1 \times (1 - 2) = \\ = \text{área } (a - 1 - 2 - b),$$

(1) Pág. 201.

o sea el volumen de tierras comprendido entre los perfiles 1 y 2. Análogamente se podría demostrar entre dos perfiles cualesquiera; por ejemplo: entre 2 y P_1 , que $c'' c' \times L = \text{área } (b-2-P_1-c)$, y por tanto, $c' c \times L$ medirá la suma algebraica de los volúmenes de desmonte comprendidos entre el origen y la sección C. Hay que tener en cuenta que las ordenadas de la curva de volúmenes deben medirse en la escala de las áreas, y la base de reducción, OM , en la de distancias.

La curva de volúmenes puede obtenerse gráficamente, deducida de la correspondiente de las áreas, en la forma sencilla que hemos expuesto;

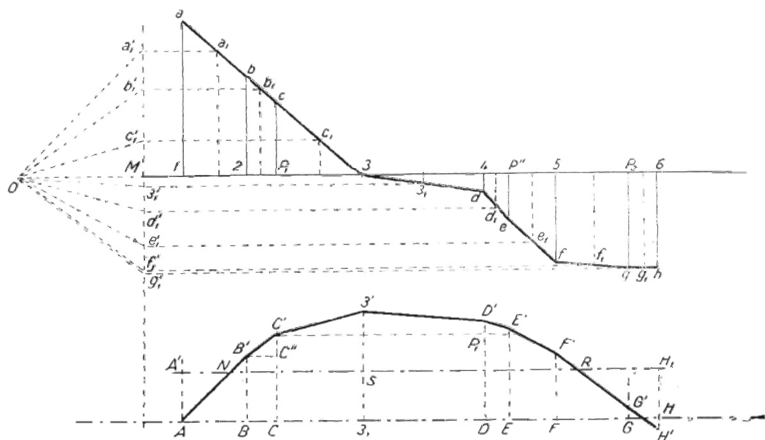


Figura 129.

si los volúmenes se hubieran calculado analíticamente, sólo sería preciso ir llevando, sobre las ordenadas verticales correspondientes, la suma algebraica de volúmenes acumulada, hasta ella. Si la obtención de la curva de volúmenes se hace por el método gráfico, cuando la claridad del dibujo lo exija, se puede cambiar de polo, O , conservando siempre la misma base, oM , para que las ordenadas de la curva puedan medirse en la misma escala.

149. Correcciones de la línea de volúmenes. — Hay que tener en cuenta que las tierras excavadas sufren un aumento de volumen por entumecimiento, según en el capítulo anterior indicamos (1); las tierras nuevas, al formar un terraplén, sufren un asiento dependiente de su naturaleza, pero siempre ocupan mayor volumen que el que tenían antes de excavar.

(1) Epígrafe 143.

Un metro cúbico de terreno natural forma los siguientes volúmenes de terraplén:

Arena	1,01	metros cúbicos.
Tierra vegetal	1,05 a 1,07	" "
Tierra arcillosa corriente.....	1,20 a 1,30	" "
Tierra arcillosa muy compacta....	1,40	" "
Roca en pedraplén.....	1,40	" "

Existen, por tanto, dos coeficientes de corrección que hemos de tener en cuenta: un metro cúbico de terreno natural ocupa, convertido en terraplén, un volumen v' , y, por otra parte, un metro cúbico de terreno natural ocupa suelto, durante el transporte, un volumen v ; si queremos formar un volumen, V , de terraplén, tendremos que excavar $\frac{V}{v'}$, y que transportar $\frac{V}{v'} \times v$.

En la línea de los volúmenes, una vez hechas las compensaciones transversales, habrá que corregir la línea correspondiente a desmontes y terraplenes, aplicando los coeficientes respectivos.

150. Propiedades de la línea de volúmenes.—La ordenada de un punto cualquiera, multiplicada por la base de reducción, según hemos demostrado, mide la suma aritmética de volúmenes de tierra hasta dicho punto.

Con el convenio de que en la curva de las áreas, los desmontes se tomen hacia arriba del eje horizontal, y los terraplenes hacia abajo, la línea de volúmenes tiene las siguientes propiedades, de gran utilidad para el estudio de la compensación de tierras:

1.º La línea de volúmenes es ascendente para los desmontes, y descendente para los terraplenes, o viceversa, según que el polo para el funicular se tome a la izquierda o a la derecha del eje vertical.

2.º La propiedad fundamental de que la ordenada de un punto cualquiera, con relación al eje horizontal de partida AH (fig. 129), mide la suma algebraica de los volúmenes de desmonte o terraplén desde el origen, puede hacerse extensiva a otra horizontal cualquiera, NR ; la ordenada de cualquier punto de la línea de volúmenes con relación a una horizontal mide la suma algebraica de los desmontes y terraplenes a partir de la sección, N , de encuentro de la línea considerada con ella; por ejemplo: la ordenada $3'S$ mide la suma algebraica de volúmenes entre la sección N y la sección S .

3.º A cada punto donde la línea de las áreas corta al eje horizontal, corresponde un máximo o mínimo de la curva de volúmenes.

4.º La diferencia entre dos ordenadas con respecto a una horizontal cualquiera, da el volumen de desmonte o terraplén disponible entre ellas; por ejemplo: la distancia P_1D' mide el exceso de tierras existente entre las secciones C y D .

5.º Entre las secciones correspondientes a los puntos de intersección de una horizontal con la línea de volúmenes, existe compensación de desmonte y terraplén, y el volumen total de tierras a mover entre esas dos secciones, será la ordenada máxima con relación a la horizontal considerada. El área $NC'D'R$ se denomina "cantera de compensación" con relación a la horizontal NR .

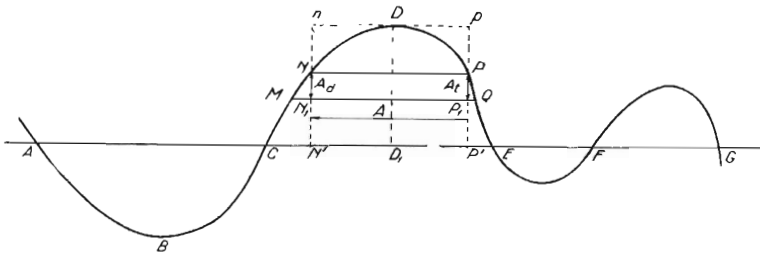


Figura 130.

Si efectuamos la compensación entre N y R desde las secciones A a N , sobrará un volumen de tierras, $A A'$, y desde las secciones R a H faltarán tierras para terraplén, con un volumen $H_1 H'$.

6.º El área de cada cantera de compensación, correspondiente a una horizontal determinada, mide el momento de transporte de la compensación entre las secciones de intersección de la horizontal, con la línea de volúmenes. Es decir, que el área ABC (fig. 130) mide el momento de transporte de la compensación entre A y C ; el CDE , entre C y E , etc. En efecto: en una cantera cualquiera de compensación, CDE , si consideramos dos horizontales infinitamente próximas, NP y MQ , el desmonte elemental, NN_1 , habrá de compensarse con el terraplén PP_1 , transportándolo a una distancia

$$\frac{NP + MQ}{2};$$

el área del trapecio, NN_1NPO , representará el momento de transporte del volumen elemental NN_1 ; el área CDE , integral del área del trapecio elemental, representará el momento de transporte de volumen de tierras,

DD_1 , entre las secciones C y E . Tendremos, por tanto, llamando, como siempre, Δ a la distancia media de transporte:

$$\text{Area } (CDE) = DD_1 \times \Delta;$$

de donde:

$$\Delta = \frac{\text{Area } (CDE)}{DD_1};$$

o sea, que la distancia media de transporte será la base del rectángulo equivalente al área CDE , y que tiene por altura DD_1 , volumen de tierras a transportar.

Hemos visto, al tratar de los diferentes medios de transporte de tierras, que cada uno de ellos tiene un radio máximo de acción, del cual,

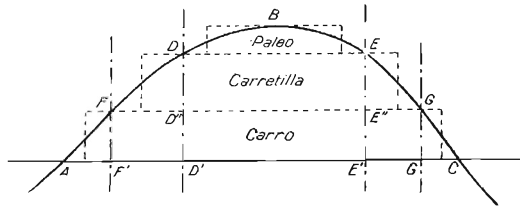


Figura 131.

económicamente, no se debe pasar. Si en una cantera de compensación, ABC (fig. 131), se van a emplear tres medios de transporte; por ejemplo: carro, carretilla y paleo, y se trazan dos horizontales que intercepten en la curva la distancia DE y FG , máximas para el transporte con pala y carretilla, el transporte con pala deberá hacerse entre las secciones D y E ; con carretilla, entre las F y G , y con carro, en el resto. Las distancias medias de transporte serán las bases de los rectángulos equivalentes a las áreas $AFGC$, para el carro; $FDEG$, para la carretilla, y DBE , para la pala.

151. Determinación gráfica de la distancia media de transporte. — La distancia media de transporte, que antes se ha deducido analíticamente, se puede determinar, con mucha facilidad, por el siguiente procedimiento gráfico.

Sea $ACDEB$ una cantera de compensación (fig. 132). Sobre la vertical DF (medida del volumen total de tierra a compensar), proyectamos los puntos a, b, c, d , medios de los distintos segmentos $AC, CD,$

$DE \dots$; se toma un polo, O , con la condición de que $OF = FD$, y se construye, a partir del punto A , el polígono funicular correspondiente, que en Bd_1 dará la distancia media de transporte buscada; en efecto, los triángulos semejantes, APa_1 y $a'OF$, dan:

$$\frac{a_1 P}{AP} = \frac{a' F}{FO};$$

de donde:

$$a_1 P = AP \frac{a' F}{FO} = \frac{\text{área } (ACP)}{FO}$$

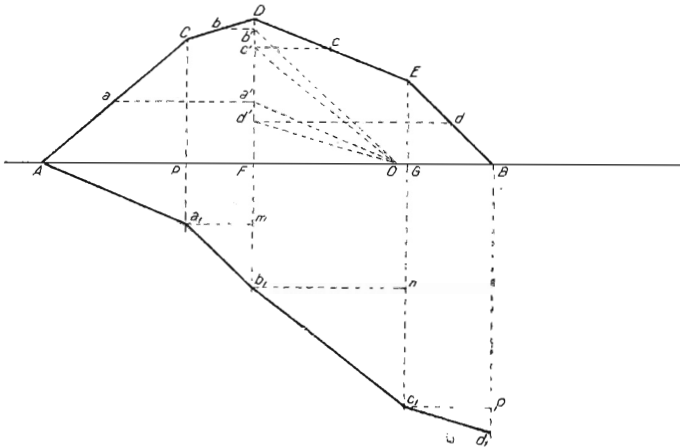


Figura 132.

Análogamente, los triángulos a_1mb_1 y $b'FO$, b_1nc_1 y $c'FO$, etc., dan:

$$m b_1 = \frac{\text{área } (CDFP)}{FO}; \quad n c_1 = \frac{\text{área } (DEGF)}{FO}; \quad p d_1 = \frac{\text{área } (EGB)}{FO};$$

y sumando,

$$a_1 P + m b_1 + n c_1 + p d_1 = B d_1 = \frac{\text{área } (ACDEBA)}{FO} = \Delta.$$

152. Línea horizontal según la cual el coste de la distribución es mínimo. — Sea una horizontal de volúmenes, $ABCD$ (fig. 133), que da una compensación determinada entre los puntos A y B , B y C , etc.; las áreas S_1, S_2, S_3 , etc., medirán los momentos de transporte en las respectivas canteras de compensación, y estas áreas, multiplicadas por

los costes unitarios de transporte, c_1, c_2, c_3, \dots , los costes totales en cada una de ellas; el total del transporte será, por tanto:

$$C = c_1 S_1 + C_2 S_2 + \dots$$

Si cambiamos la línea de compensación, moviendo la línea AG , una magnitud infinitamente pequeña, Δh , hasta $A'G'$, las áreas correspondientes a S_1, S_3, S_5 habrán sufrido un aumento de $\Delta h \times AB, \Delta h \times CD, \Delta h \times EF$, y los momentos de transporte, S_2, S_4, S_6 , una disminución,

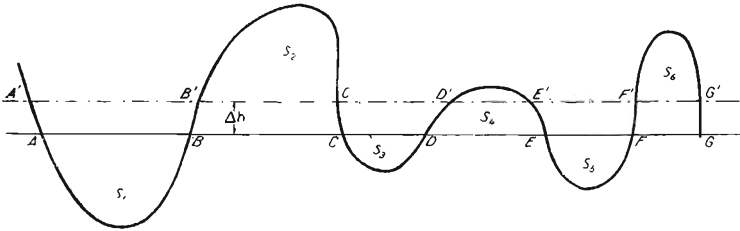


Figura 133.

$\Delta h \times BC, \Delta h \times DE, \Delta h \times FG$; en definitiva, el movimiento de la horizontal habrá producido un aumento de coste

$$\Delta h (AB \times C_1 + CD \times C_3 + EF \times C_5);$$

y una disminución

$$\Delta h (BC \times C_2 + DE \times C_4 + FG \times C_6),$$

y la variación del coste total será:

$$\Delta C = \Delta h (AB \times C_1 + CD \times C_3 + EF \times C_5 - BC \times C_2 - DE \times C_4 - FG \times C_6);$$

la condición de que el coste sea mínimo, obliga a que

$$\frac{\Delta C}{\Delta h} = 0,$$

o sea, en definitiva, que

$$AB \times C_1 + CD \times C_3 + EF \times C_5 = BC \times C_2 + DE \times C_4 + FG \times C_6.$$

Si los costes de los transportes dentro de cada una de las canteras de compensación son distintos, la fórmula anterior será la que de-

termine la horizontal de coste mínimo. Si para todas las canteras de compensación el valor unitario del transporte es el mismo, entonces la horizontal de coste mínimo será la que cumpla la condición de que

$$AB + CD + EF = DC + DE + FG.$$

En este caso, la determinación de la horizontal de coste mínimo, puede hacerse gráficamente con gran facilidad: se traza una horizontal cualquiera, PQ (fig. 134), en la cual la suma de los segmentos correspondientes a las canteras de compensación 1, 3, 5 es menor que la correspondiente a las canteras 2, 4, 6; la diferencia, $5A$, se lleva en PA ; se

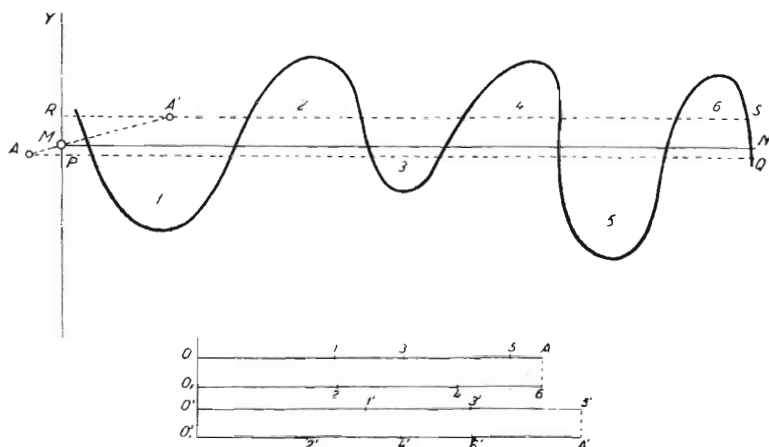


Figura 134.

mueve la línea de compensación a otra posición, RS , y la diferencia $6'A'$, en sentido contrario de la anterior, se lleva en RA' hacia el otro lado del eje, PY ; repitiendo varias veces la operación, el lugar de los puntos A será la curva de error que cortará al eje P en un punto, M , que dará la horizontal buscada. En la práctica, la curva de error se puede sustituir por la recta AA' .

153. Casos particulares. Perfiles no compensados. Líneas secundarias de compensación. — Se trata de una curva de volúmenes, como la figura 135; no estando los puntos extremos, A y G , en la misma horizontal, no podrá existir una compensación total. La horizontal AM_1 no cumple la condición del mínimo coste, porque $Ab + De < bD + + eM_1$; producirá, en cambio, una compensación total entre A y M_1 ; pero se tendrá que formar con préstamos el terraplén gG entre M_1 y g .

Si el coste del volumen gG de préstamos fuese excesivo por las condiciones locales, podría ser económicamente conveniente hacer una compensación parcial entre A y b , formando con préstamos el terraplén b_1M , y compensar el resto según la horizontal MN , que es de mínimo coste, ejecutando al final, con préstamos, el terraplén NG .

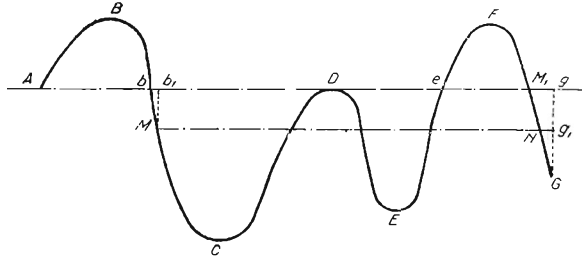


Figura 135.

Los tanteos, por este procedimiento, son muy sencillos; comparando cuidadosamente diversas soluciones, se podrá llegar, en casos de perfiles no compensados, a la solución que económicamente resulte más recomendable. Se presenta con frecuencia el caso de un perfil compensado en su totalidad (fig. 136), pero que arriba o abajo de la línea de la horizontal elegida presente una cantera de compensación, $CmDnEpF$,

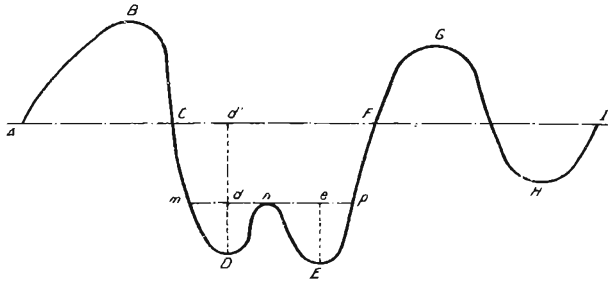


Figura 136.

con dos máximos, D y E ; en este caso, puede ser una solución hacer entre m y n una compensación parcial, y otra entre n y p , formando el terraplén, mC , con los productos del desmonte, pF ; la distancia media de transporte sería, en la cantera de compensación parcial entre m y n :

$$\frac{\text{área } (m D n)}{D d}$$

entre n y p :

$$\frac{\text{área } (n E p)}{E e},$$

y entre C y F :

$$\frac{\text{área } (C m p F)}{d d'};$$

el volumen total transportado vendrá medido, respectivamente, por

$$D d + E e + d d' = D d' + E e.$$

154. Influencia de la pendiente del camino.— Los casos anteriores se refieren a transporte en terreno horizontal. Cuando el perfil del camino tenga una cierta rasante, habrá que determinar la distancia virtual, para tener en cuenta la pendiente del camino, si el transporte se hace subiendo; y esta distancia virtual, mayor que la real, hará variar la distribución más económica; si la distribución se puede hacer bajando, cuando la pendiente del camino es menor o igual a la límite o de frenado, no habrá que aumentar distancia alguna a las reales que resulten; por esta causa, como es lógico, la distribución para obtener el mínimo coste, deberá hacerse, en cuanto sea posible, transportando las tierras en el sentido de la pendiente; solamente en aquellos tramos en los cuales las distancias en sentido de la pendiente sean superiores a las virtuales precisas, puede ser económico el transporte subiendo.

155. Préstamos y caballeros.— Cuando el volumen de desmonte sea inferior al de terraplén, o cuando, siendo igual, las distancias medias de transporte sean excesivas, podrá resultar conveniente tomar tierras para la formación de los terraplenes, excavando expresamente para este fin, tomándola de “préstamos”. El coste del terraplén, en este caso, estará formado por el de la excavación, especialmente realizada con este objeto, y el de transporte al punto de la formación del terraplén; para que el “préstamo” sea conveniente, habrá que buscar zonas de terreno de excavación económica y situadas a la mínima distancia del punto de utilización, o sea donde se verifique:

$$K_e V + K_t \delta V \text{ mínimo,}$$

donde K_e y K_t son los costes unitarios de excavación y transporte, V , el volumen preciso, y δ , la distancia media de transporte.

Cuando sobren tierras o no resulte económico transportarlas hasta

el punto donde sea preciso formar los terraplenes, se depositan en zonas determinadas, formando "caballeros"; las zonas donde se depositan las tierras sobrantes son, normalmente, muy próximas a la explanación del camino, y, a ser posible, con transporte bajando. El problema se complica más en zonas urbanas o semiurbanas, en las cuales, a veces, hay que depositar las tierras en vertederos alejados, donde incluso hay que abonar un canon por metro cúbico depositado.

En el cálculo del coste del transporte para préstamos y caballeros, deberá aplicarse cuanto a este objeto hemos expuesto, según se trate de vía paralela o convergente en horizontal o con un cierto desnivel.

156. Método de compensación del formulario español para la redacción en los proyectos de carreteras.— Construido el perfil longitudinal, se calculan los volúmenes de desmonte y terraplén que corresponden a cada uno de los entreperfiles, volumen que se supone concentrado en el punto medio entre los dos perfiles considerados. Hecho esto, se dibuja el perfil gráfico de distribución en la forma que se indica en la figura 137; sobre la ordenada correspondiente a cada entreperfil, se levanta una vertical y, sobre ella, se llevan hacia arriba los desmontes y hacia abajo los terraplenes; por ejemplo, en la figura, que reproduce la del formulario oficial, se ha tomado como ordenada de origen la 1.500 para los volúmenes; en la ordenada del entreperfil número 1, se ha llevado la magnitud $1.500 + 120,70 = 1.620,70$ hacia arriba, puesto que 120,70 es un desmonte; en el entreperfil número 2, la ordenada será: $1.620,70 - 5,90 = 1.614,60$, puesto que 5,90 es terraplén, y así sucesivamente. Las horizontales entre los extremos de la quebrada que así resultan, interceptarán los volúmenes compensables, entre dos entreperfiles consecutivos; por ejemplo: entre los entreperfiles 1 y 2 se compensará 5,90 m. de desmonte (trozo $ab = a'b$) a la distancia entre los dos entreperfiles, o sea a 46,26 m., y quedará disponible el volumen bc en el primer entreperfil; este volumen, bc , sirve para formar el terraplén $dd' = 114,83 \text{ m.}^3$ del entreperfil 3, con una distancia de transporte de 83,57 m., quedando este entreperfil falto de volumen de tierras, $d'd''$, que se ha de formar desde el primer desmonte. Como no existe tierra de desmonte hasta el entreperfil 5 y con el volumen total disponible en él, $29,31 \text{ m.}^3$, se han de compensar los $17,68 \text{ m.}^3$ que nos faltan en el entreperfil 3 y los $21,35 \text{ m.}^3$ del entreperfil 4, o sea un total de $39,03 \text{ m.}^3$, habrá que tomar de caballeros, 9,75 m., que faltan para formar el volumen total preciso. El procedimiento es sencillo, aunque algo fatigoso, y, a nuestro juicio, tiene la desventaja, frente al método de BRUCKNER, pues en éste, más gráfico, los tanteos de las diversas soluciones son

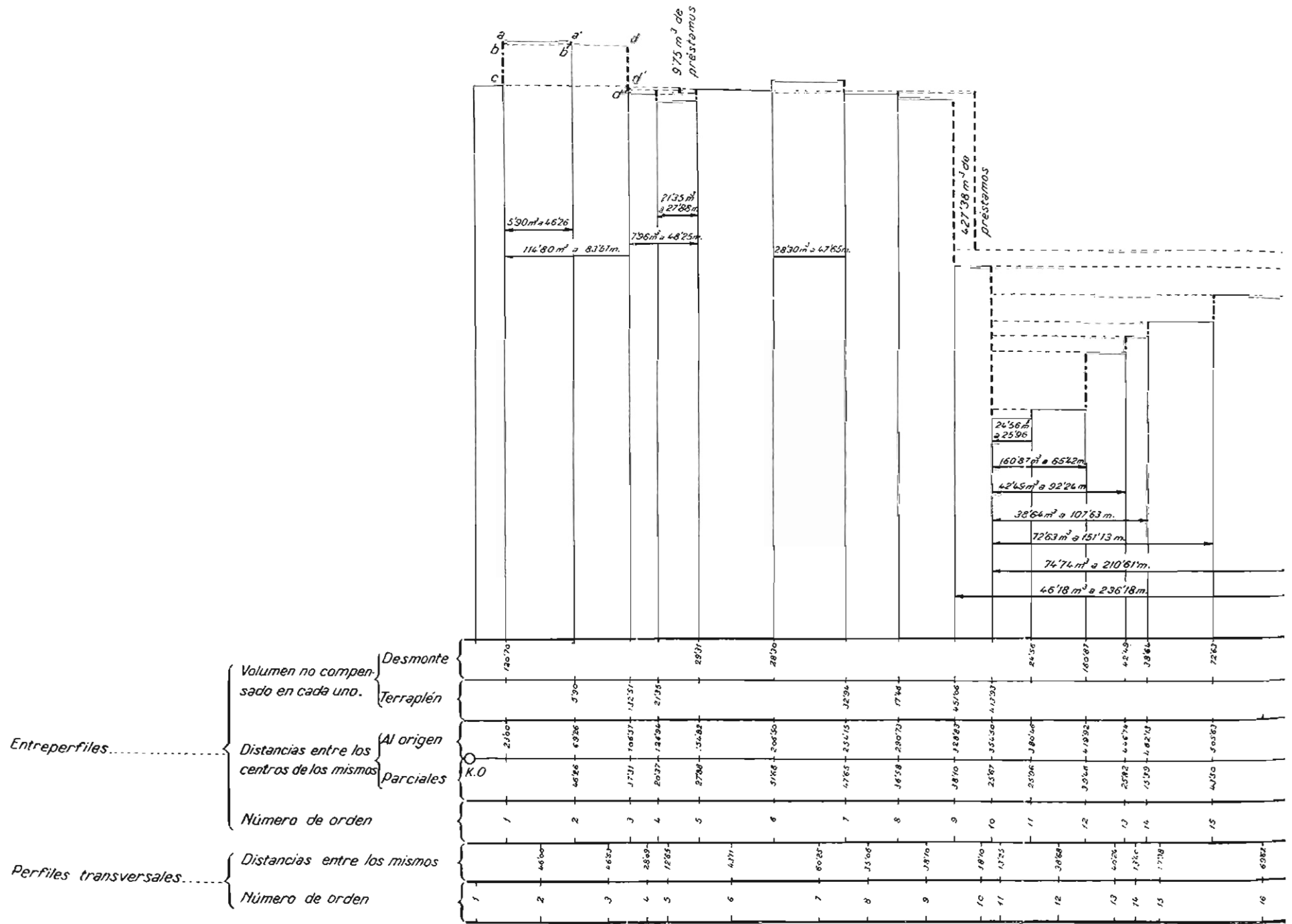


Figura 137.

más fáciles y rápidos; la curva de las áreas es la única que exige un cálculo numérico, y después, los volúmenes y las diferentes soluciones se obtienen gráficamente con gran rapidez. El procedimiento de la Instrucción española exige más cálculos numéricos y es más lento. Como en el método de BRUCKNER, los volúmenes que deben figurar en el gráfico, son los utilizables; es decir, descontadas la compensación transversal y las tierras no utilizables.