



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE
TRANSPORTE II

MOVIMIENTO DE SUELOS GUÍA PARA RESOLUCIÓN PRÁCTICA

Ing. Sabina Fanelli

AÑO 2020

1. Introducción

En la práctica de este tema, para realizar la compensación integral del movimiento de suelos y computar las necesidades de transporte de los mismos, empleamos los siguientes métodos:

- Diagrama de áreas: utilizados en zonas de llanura y onduladas.
- Diagrama de Brückner: de aplicación en zonas de montaña y alta montaña.

En ambos casos partimos de una discretización del tramo que estamos evaluando, es decir, contaremos con secciones transversales en diferentes progresivas, las cuales estarán separadas entre sí con las consideraciones vistas en el Apunte "Movimiento de suelos".

Esas secciones transversales deben estudiarse considerando que cuando computemos áreas en las mismas, estamos considerando la configuración resultante del diseño del coronamiento, taludes, cunetas, etc., y el terreno natural relevado en las campañas de relevamiento topográfico, u obtenido de planos con curvas de nivel.

2. La sección transversal

En el tramo tendremos diferentes secciones transversales: en terraplén, en desmonte o a media ladera. La Figura 1 muestra una sección en terraplén donde tenemos un área de terraplén (T_1) y dos áreas en desmonte (D_1 y D'_1).

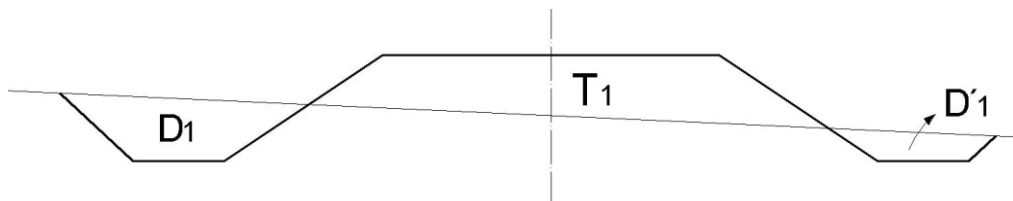


Figura 1

Una primera consideración a realizar es que el terraplén que medimos como T_1 se encuentra en densidad compactada mientras que las excavaciones medidas como D_1 y D'_1 se encuentran en densidad in situ (Figura 2).

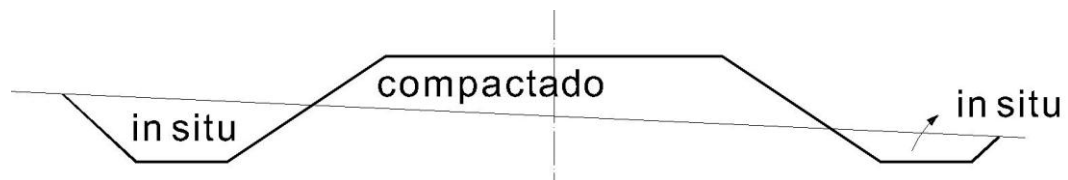


Figura 2

El área que medimos como T_1 incluye el paquete estructural (P.E.), el cual no se compone de suelo proveniente de las cunetas sino que por materiales comerciales. Tampoco incluye la limpieza del terreno (L) que se realizará al momento de la construcción, al igual que la compactación de la base de asiento del terraplén (C) (Figura 3).

Algo similar ocurre en la zona en desmonte, al realizar la limpieza del terreno, se reducen las áreas medidas originalmente D_1 y D'_1 .

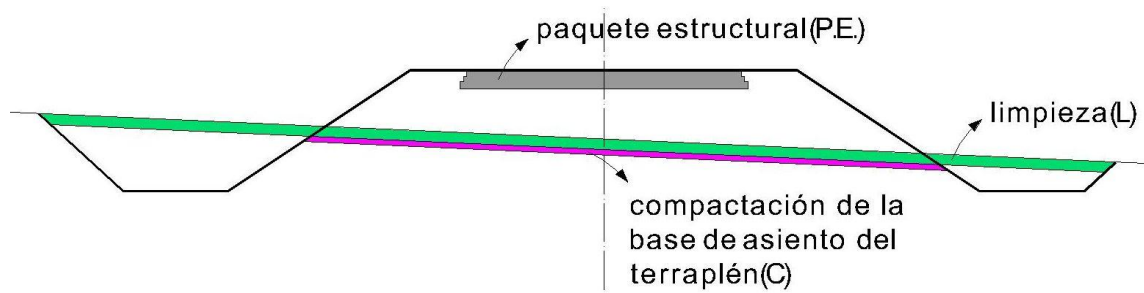


Figura 3

Entendiendo que cuando nos referimos a la limpieza L, la misma corresponde a la porción de la limpieza en la zona de terraplén (L_T) y desmonte (L_D) por separado.

Entonces,

- el terraplén neto será el área indicada en rojo en Figura 4, es decir:

$$T_{neto} = T_1 + L_T + C - P.E.$$

- el desmonte neto será la suma de las áreas en azul en la misma figura, es decir:

$$D_{neto} = D_1 + D'_1 - L_D$$

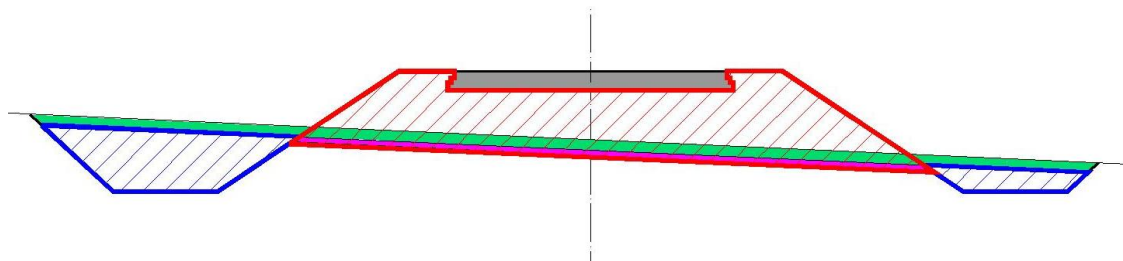


Figura 4

Para unificar las densidades en posición compactada, al valor obtenido D_{neto} habrá que afectarlo por el coeficiente de compactación del suelo de la zona que estamos analizando, para que se encuentre en la misma densidad que el terraplén, para luego realizar la compensación de suelos. Por lo tanto:

$$D_{reducido} = D_{neto} \times C_{COMP.}$$

Ejemplo:

La Figura 5 corresponde a la sección transversal en la Progresiva 0 del tramo en estudio, en la cual se han computado todas las áreas necesarias.

Los datos de Figura 5 se han volcado en la

Tabla 1 y operando se obtuvieron T_{neto} y D_{neto} .

Luego, considerando que el coeficiente de compactación $C_{COMP.} = 0,85$ se calculó $D_{reducido}$.

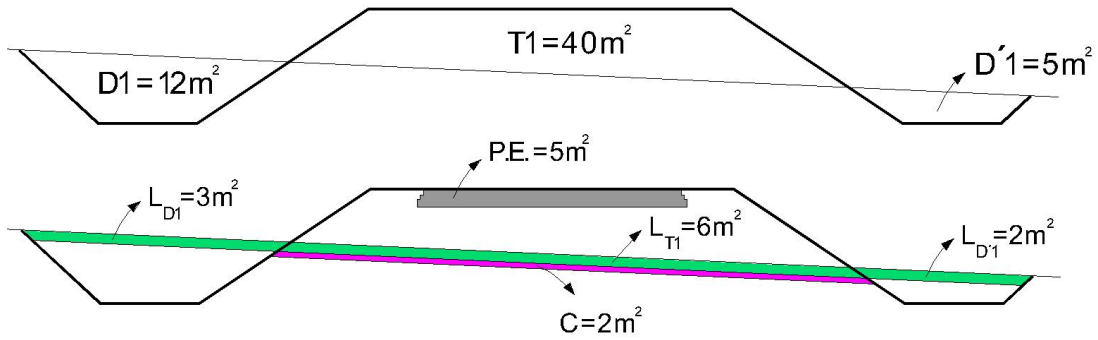


Figura 5

Tabla 1 – Planilla de Áreas

PR.	DESMONTE (m ²)			TERRAPLÉN (m ²)				D _{neto}	T _{neto}	D _{reducido}
	D	Paquete estruct.	Limpieza	T	Paquete estructural	Limpieza	Comp. Base asiento			
0	17.00	0.00	5.00	40.00	5.00	6.00	2.00	12.00	43.00	10.20
100										
200										

Se completa la Tabla, con tantas filas como perfiles transversales se tienen en el tramo.

3. Diagrama de áreas modificado

En este diagrama se grafican los valores de terraplén abatidos sobre los valores de desmonte (Figura 6).

Estableceremos las escalas de dibujo para ambos ejes, utilizando el eje de las abscisas para las progresivas y el de las ordenadas para las respectivas áreas de T_{neto} y $D_{reducido}$ recordando dejar el suficiente lugar debajo para agregar los renglones, según Fig. 23 del Apunte “Movimiento de suelos”.

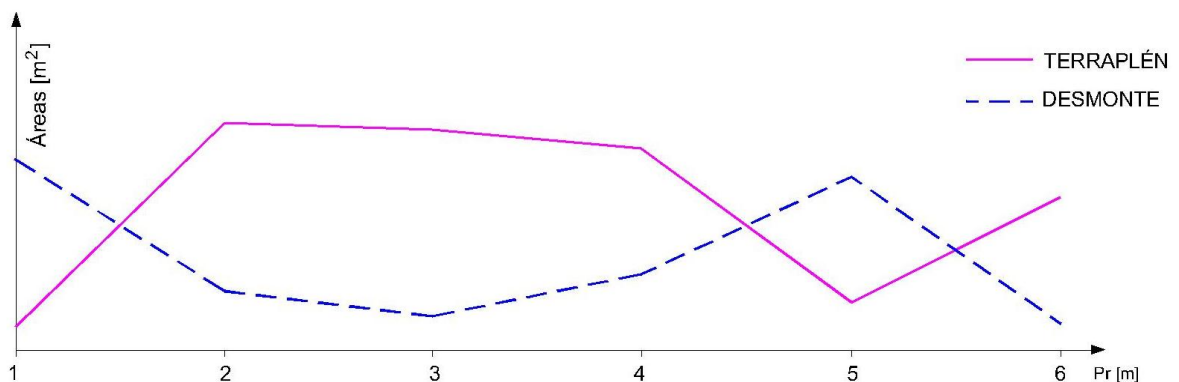


Figura 6

Recordamos que una superficie en el diagrama de áreas representa un volumen [m x m²].

El diagrama logrado permite evaluar el volumen de suelo necesario para la formación de los terraplenes y la disponibilidad de material proveniente de las excavaciones proyectadas. La figura encerrada en magenta indica el volumen de terraplenes a construir [m³] (Figura

7), mientras que la figura encerrada en azul indica el volumen de las excavaciones a realizar [m³] (Figura 8).

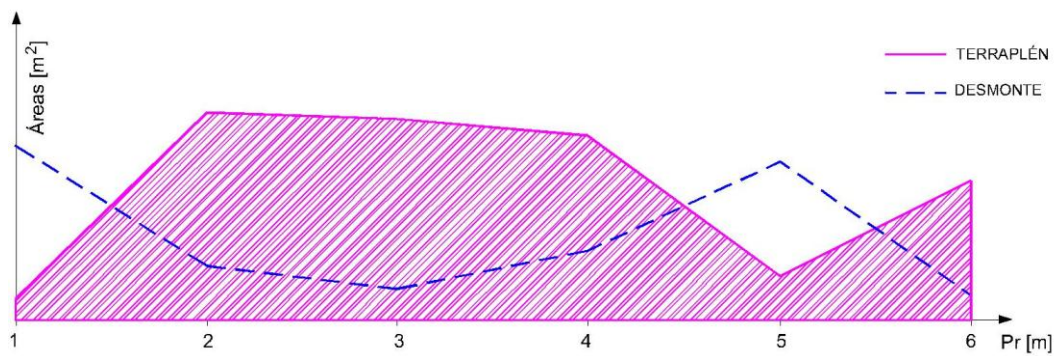


Figura 7

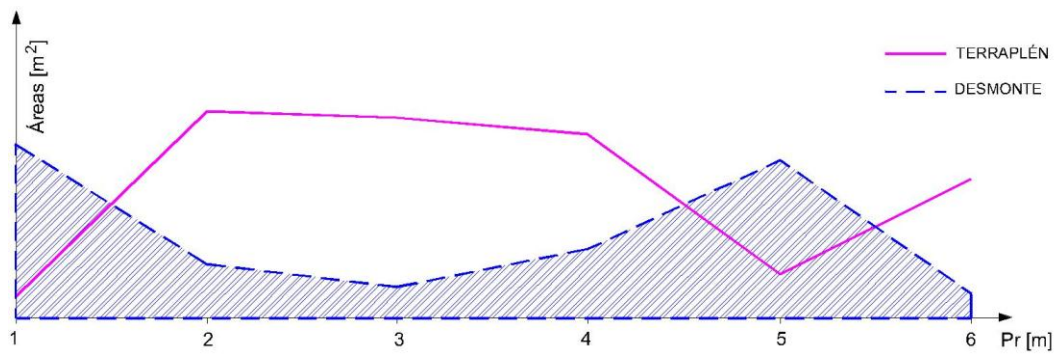


Figura 8

En la Figura 9, la superficie encerrada en rojo en indica el volumen total de suelo que se compensa transversalmente [m³] en el tramo.

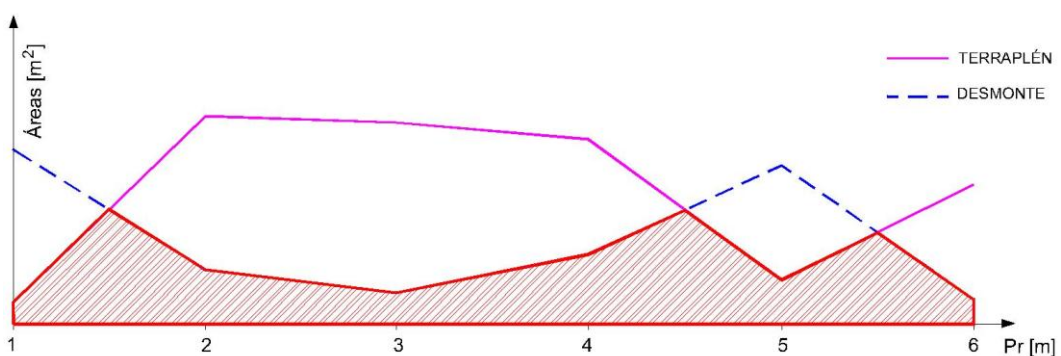


Figura 9

Entonces, lo que queda pendiente de compensar puede verse en verde en la Figura 10.

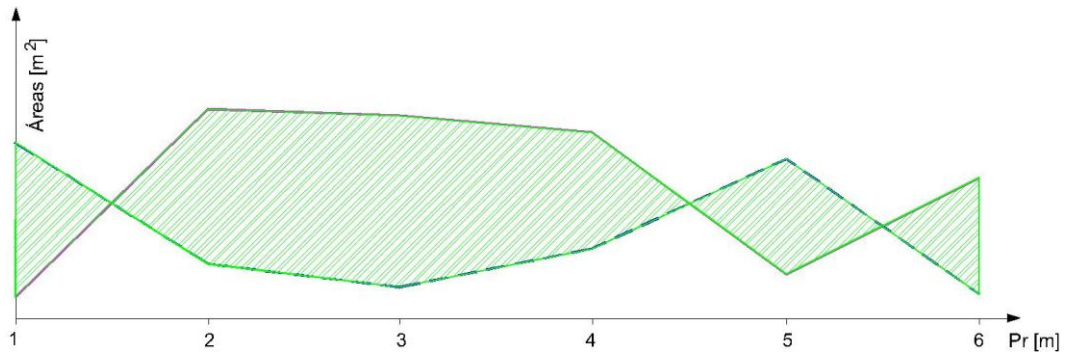


Figura 10

Analizando la ubicación de la línea que representa los terraplenes respecto a la que representa los desmontes podemos deducir si las diferentes áreas indicadas en verde en la Figura 10 corresponden a suelo disponible o faltante.

En la Figura 11 puede verse que entre las Pr. 1 y, aproximadamente, Pr. 1,5, la figura representa un sobrante de suelos ya que a lo largo de esa distancia son mayores los desmontes que los terraplenes. Del mismo modo se interpreta que la figura que se forma entre Pr 1,5 y Pr 4,5 corresponde a un déficit de suelos, etc.

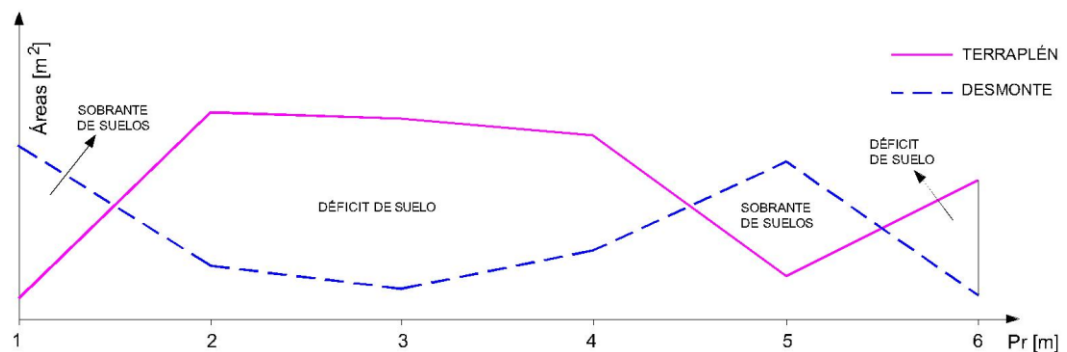


Figura 11

Para realizar la compensación del diagrama, se deben definir las cámaras de trabajo compensadas, es decir, entre qué progresivas se igualen los sobrantes y los déficits de suelos.

En la Figura 12, entre las Pr. 1 y Pr. 2 debido que el volumen E_1 es igual al volumen T_1 , se conforma la primera cámara de trabajo compensada. Por este motivo, "cerraremos" el renglón "Excavación a transportar" entre las progresivas mencionadas y completaremos con el valor numérico del volumen de la cámara. Del mismo modo "cerraremos" el renglón "distancia total de transporte" (DTT) y completaremos con el valor que corresponde. En este caso ese valor es la distancia entre los centros de gravedad de la figura que representa el desmonte excedente y de la figura de necesidad de terraplén que se compensan entre sí (en el ejemplo de la primera cámara compensada son dos triángulos) (Figura 13). Esta distancia considera la separación entre los centros de gravedad únicamente en el sentido de las abscisas.

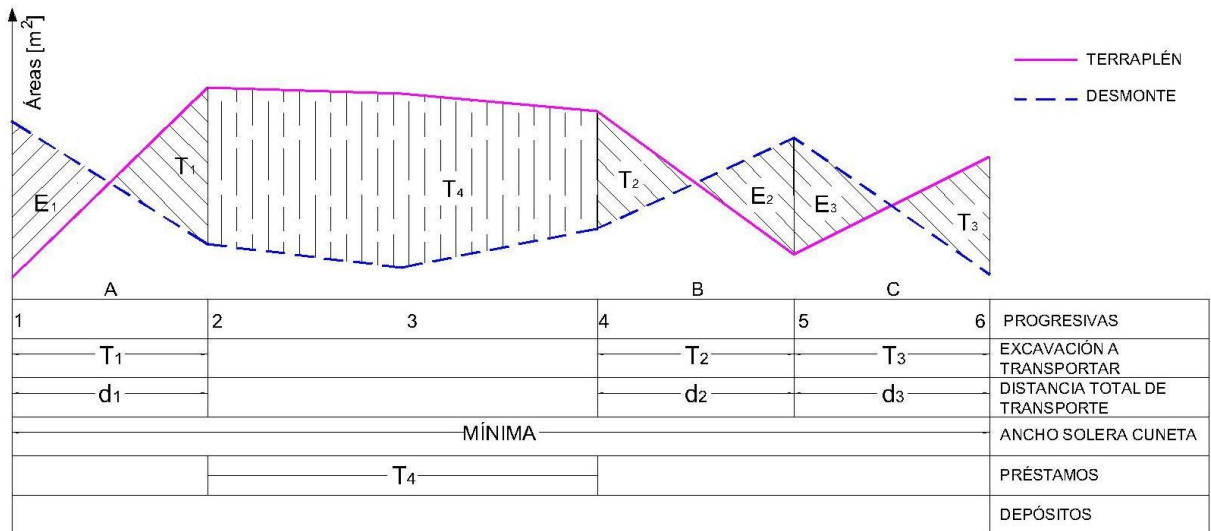


Figura 12

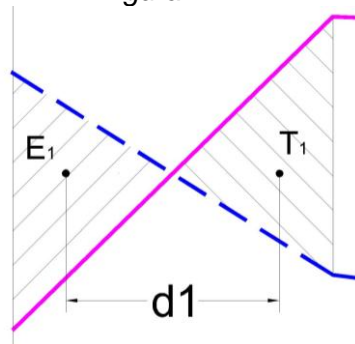


Figura 13

En el mismo ejemplo, se conforma otra cámara de trabajo compensada entre las Pr. 4 y Pr. 5 y la última entre las Pr. 5 y Pr. 6.

En estas tres cámaras se produce compensación longitudinal de suelos ya que, por ejemplo, el suelo sobrante E₁ se trasladará para conformar los terraplenes necesarios entre A y Pr. 2.

Finalmente, en el sector comprendido entre las Pr. 2 y Pr. 4, queda un déficit de suelos que no se ha podido compensar con el suelo disponible, entonces el volumen T₄ corresponde a un préstamo. Esto se indica "cerrando" el renglón "Préstamos" entre las progresivas correspondientes y colocando el valor numérico que corresponde a T₄.

En el caso de un sector donde no pudiéramos compensar un tramo con sobrante de suelos, se realizará lo mismo que se indicó anteriormente pero en el renglón "Depósitos" y se indicará el valor del volumen correspondiente dividiéndolo por el coeficiente de transformación (los depósitos son excavaciones que no se utilizan; se miden y pagan en posición in situ).

En el ejemplo de Figura 12, el préstamo representa una compensación adicional. Una solución posible es intentar obtener mayor cantidad de suelos en la zona de camino del proyecto. Con esa finalidad, se analizan los perfiles transversales con el objetivo de evaluar si se puede ensanchar la solera de la cuneta. La limitación que tenemos para esto es el ancho de la zona de camino y el ancho mínimo de la zona de servicio (o vereda) (Figura 14).

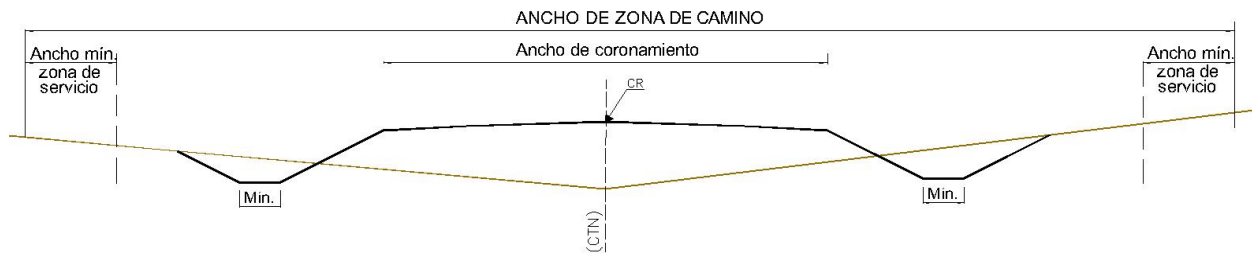


Figura 14

Con esas consideraciones podemos ensanchar la solera de las cunetas hasta un máximo, como puede verse en Figura 15.

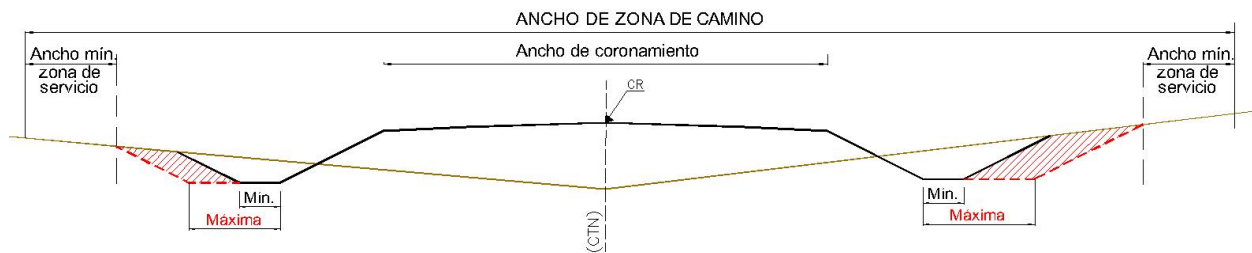


Figura 15

4. Diagrama de áreas modificado con cuneta máxima y cuneta mínima

El estudio del movimiento de suelos se inicia siempre con las cunetas mínimas. Si se necesita mayor volumen de excavaciones, se recurre a las cunetas máximas ya descritas.

Esos datos se colocarán en una columna adicional en la Planilla de Áreas, y luego los valores se grafican identificando claramente con código de trazos o colores cada una de las cunetas.

Tabla 2

PR.	$D_{mín_{red}}$ [m ²]	$D_{máx_{red}}$ [m ²]	T_{neto} [m ²]
0	15.66	25.56	47.60
100	33.30	44.37	33.30
200	47.94	56.31	16.00
300	33.39	43.29	33.39
400	4.16	42.86	36.10
500	18.09	33.84	21.70
600	14.22	31.95	31.95
700	20.61	33.17	45.31

En el primer paso vamos a considerar la compensación entre el terraplén T_{neto} y la cuneta mínima $D_{mín_{reducido}}$ (Figura 16). En este caso se compensan dos cámaras de trabajo: entre progresivas 0 y 200, y entre progresivas 200 y 400. Entre progresivas 400 y 700 queda un Préstamo (indicado en verde en Figura 16).

5. Otras consideraciones

Cuando se pida que indiquen el sentido del acarreo, implica mostrar como se trasladarán los suelos dentro de cada cámara de trabajo compensada. Es decir, marcar con una flecha desde donde ocurre el exceso de suelos hacia la zona del déficit (Figura 18).

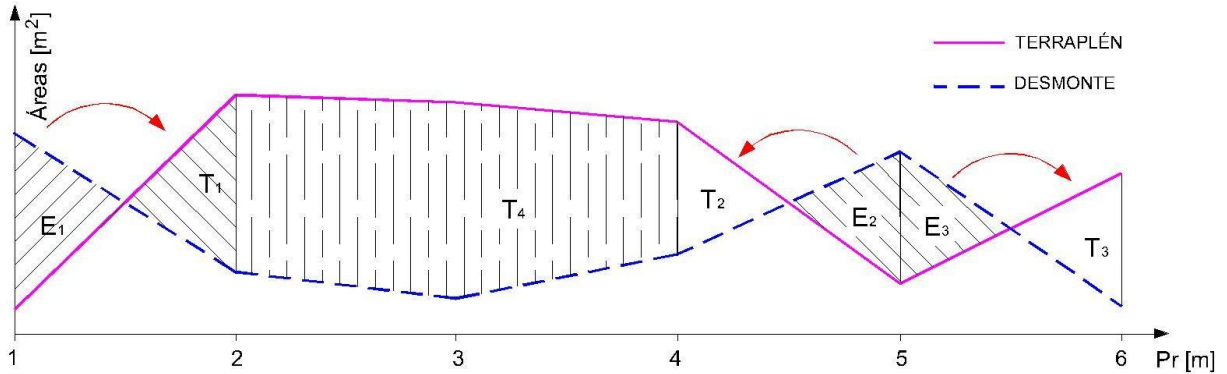


Figura 18

Cálculo del ítem “Transporte de suelos”:

Para cada cámara de trabajo compensada la distancia excedente de transporte (DET) [Hm], multiplicada por el volumen [m³] de suelo transportado, da el número de unidades del ítem Transporte de suelos [Hm m³].

Para calcular el ítem completo debemos realizar la sumatoria de este cálculo para todas las cámaras que se compensaron en el proyecto.

Se recuerda que el volumen de suelo transportado se mide en su posición originaria, teniendo en cuenta la especificación definida en el Apunte de Movimiento de suelos.

Ítem transporte de suelos para el ejemplo de Figura 12 será:

$$\frac{T_1 \times (d_1 - DCT)}{C_{COMP.}} + \frac{T_2 \times (d_2 - DCT)}{C_{COMP.}} + \frac{T_3 \times (d_3 - DCT)}{C_{COMP.}}$$

Cálculo del ítem “Terraplenes”: implica calcular el total de terraplenes a construir en el tramo, como ya se mencionó es el área sombreada en magenta en la Figura 7. Cabe aclarar que podemos descomponer la figura con líneas verticales a lo largo de cada progresiva, de ese modo se forman figuras geométricas conocidas como triángulos o trapecios, con lo cual se puede calcular sus áreas sin necesidad de recurrir a ningún artificio. Por ejemplo en el caso de la Figura 7, se forman 5 trapecios (Figura 19).

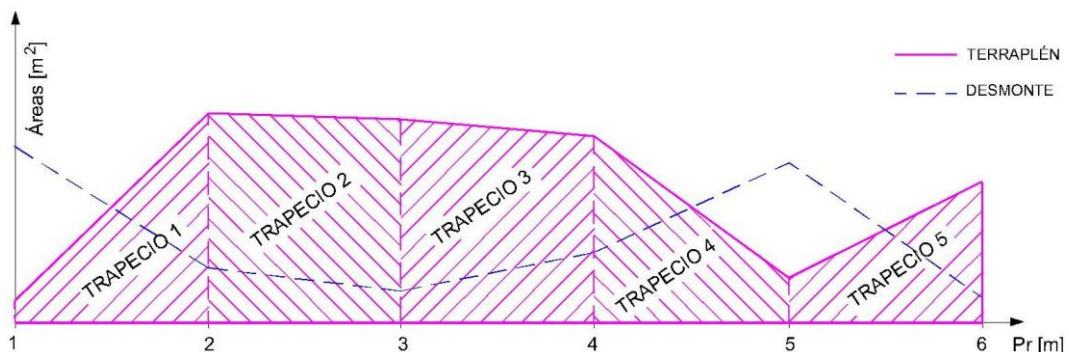


Figura 19

Cálculo del ítem “Excavaciones”: aplica el mismo criterio explicado para el cálculo del ítem “Terraplenes”, pero con el área de la Figura 8.

6. Volúmenes de suelo

Para obtener volúmenes aplicamos el “método de las medias de las áreas” como se explicó en el Apunte “Movimiento de suelos”.

Se parte de la Planilla de Áreas (Tabla 3). El primer paso es calcular los terraplenes y desmontes medios entre dos secciones transversales consecutivas: $T_{m1}, T_{m2}, \dots, T_{mi}$ y $D_{m1}, D_{m2}, \dots, D_{mi}$.

$$T_{m1} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad T_{m2} = \frac{T_2 + T_3}{2} \quad \dots$$

$$D_{m1} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad D_{m2} = \frac{D_2 + D_3}{2} \quad \dots$$

El paso siguiente es obtener volúmenes, para ello multiplicaremos los terraplenes y desmontes medios por la distancia (d) que separa dos secciones transversales consecutivas. En el caso del ejemplo mostrado en Tabla 3, esa distancia es de 100 m.

$$V_{T1} = T_{m1} \times d \quad V_{T2} = T_{m2} \times d \quad \dots$$

$$V_{D1} = D_{m1} \times d \quad V_{D2} = D_{m2} \times d \quad \dots$$

Tabla 3 – Planilla de Volúmenes

PR. [m]	D _{reducido} [m ²]	T _{neto} [m ²]	D _m [m ²]	T _m [m ²]	V _D [m ³]	V _T [m ³]
0	D1	T1				
100	D2	T2	D _{m1}	T _{m1}	V _{D1}	V _{T1}
200	D3	T3	D _{m2}	T _{m2}	V _{D2}	V _{T2}
300	D4	T4	D _{m3}	T _{m3}	V _{D3}	V _{T3}
400						

7. Diagrama de Brückner

Para aplicar este método necesitamos calcular volúmenes excedentes acumulados.

Para ello continuamos operando sobre los volúmenes obtenidos (Tabla 3).

Consideramos positivos los volúmenes de desmonte V_D y le restamos los volúmenes de terraplén V_T en cada progresiva, colocando el resultado en la columna “Excedente” con el signo que surja de la resta.

$$E_1 = V_{D1} - V_{T1} \quad E_2 = V_{D2} - V_{T2} \quad \dots$$

Finalmente, calcularemos los volúmenes excedentes acumulados:

$$VEA_1 = 0 \pm E_1$$

$$VEA_2 = VEA_1 \pm E_2$$

$$VEA_3 = VEA_2 \pm E_3$$

Tabla 4

PR. [m]	D _{reducido} [m ²]	T _{neto} [m ²]	D _m [m ²]	T _m [m ²]	V _D [m ³]	V _T [m ³]	Excedente [m ³]	Vol. excedente acumulado [m ³]
0	D1	T1						0
100	D2	T2	D _{m1}	T _{m1}	V _{D1}	V _{T1}	E ₁	VEA ₁
200	D3	T3	D _{m2}	T _{m2}	V _{D2}	V _{T2}	E ₂	VEA ₂
300	D4	T4	D _{m3}	T _{m3}	V _{D3}	V _{T3}	E ₃	VEA ₃
400								

Obtenidos los resultados podemos aplicar el método, adoptando las escalas de dibujo, considerando que se utiliza el eje de las abscisas para las progresivas y el de las ordenadas para el volumen excedente acumulado *VEA* (Figura 20).

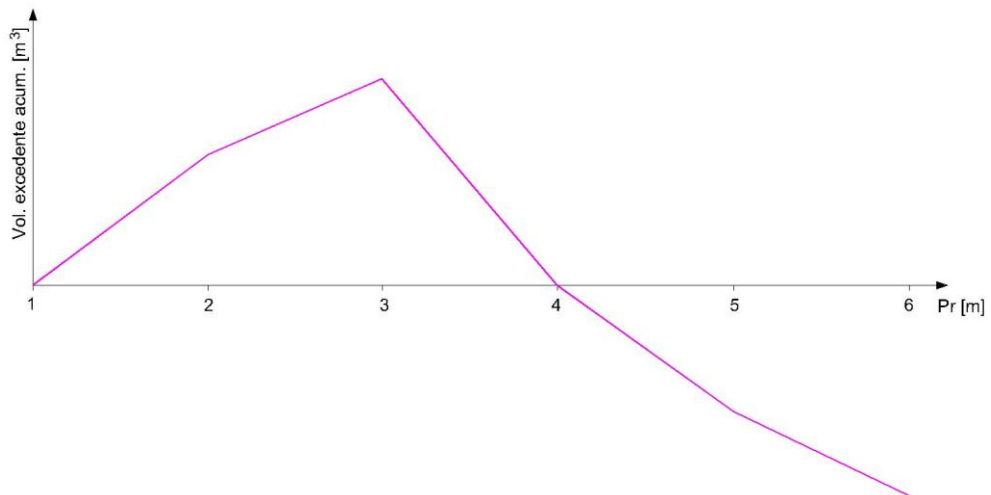


Figura 20

A continuación tenemos que realizar la compensación de suelos.

En este caso, las cámaras de trabajo se cierran a través de horizontales de distribución, es decir, una línea horizontal que debe ser intersectada dos veces por la línea magenta que representa los volúmenes excedentes acumulados.

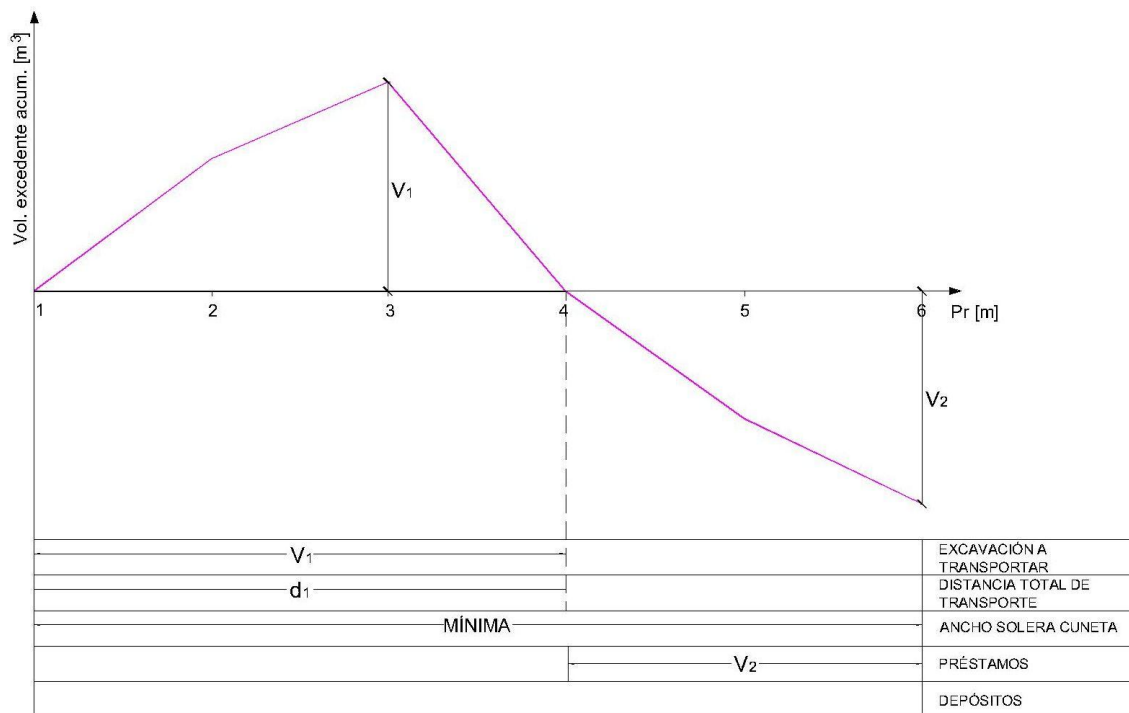


Figura 21

Analizando la Figura 21, podemos trazar una horizontal de distribución que cumpla dicha condición, en coincidencia con el eje de las abscisas. Se obtiene una cámara de trabajo compensada entre las progresivas 1 y 4, cuyo volumen es V₁ por ser la ordenada máxima de la cámara. Del mismo modo que se indicó en el diagrama de áreas, el valor numérico se completa en el reglón “Excavación a transportar”.

Entre las progresivas 4 y 6 no se puede cerrar otra cámara de trabajo. En ese sector tendremos un volumen de préstamo V₂ porque la pendiente del diagrama es negativa. Si la pendiente fuera positiva indica que es un depósito. En caso de ser un depósito, debemos recordar afectar el valor del volumen por el coeficiente de transformación para expresarlo en densidad in situ.

Para calcular la distancia total de transporte, se realiza la división del momento de transporte de la cámara (M) por el volumen de la misma:

$$DTT_i = \frac{M_i}{V_i}$$

Recordando que el momento de transporte de una cámara es la superficie que encierra la misma (Figura 22).

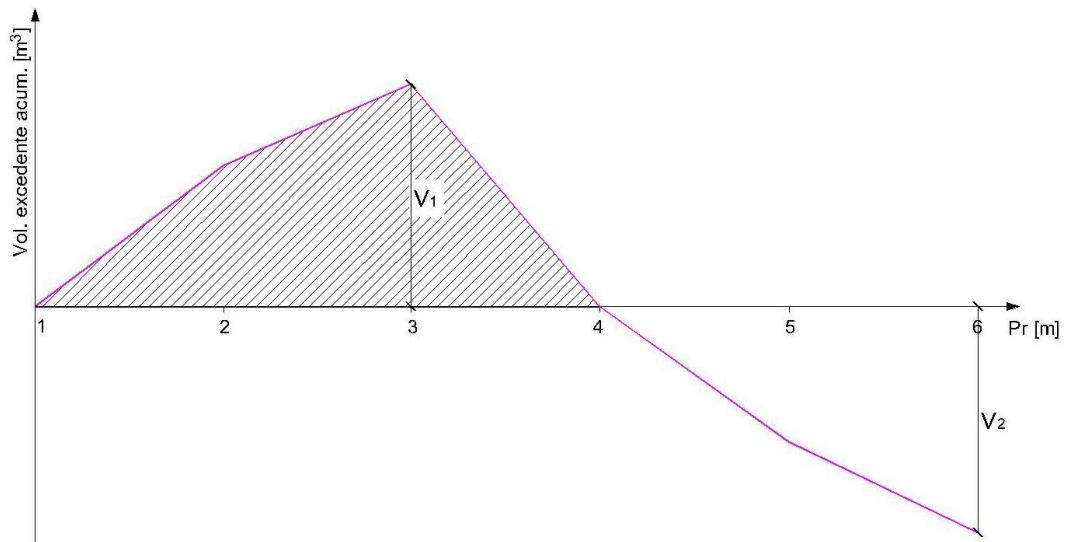


Figura 22

En la Figura 23 se muestra un ejemplo más complejo. Las opciones A, B y C muestran diferentes formas de compensar el mismo diagrama.

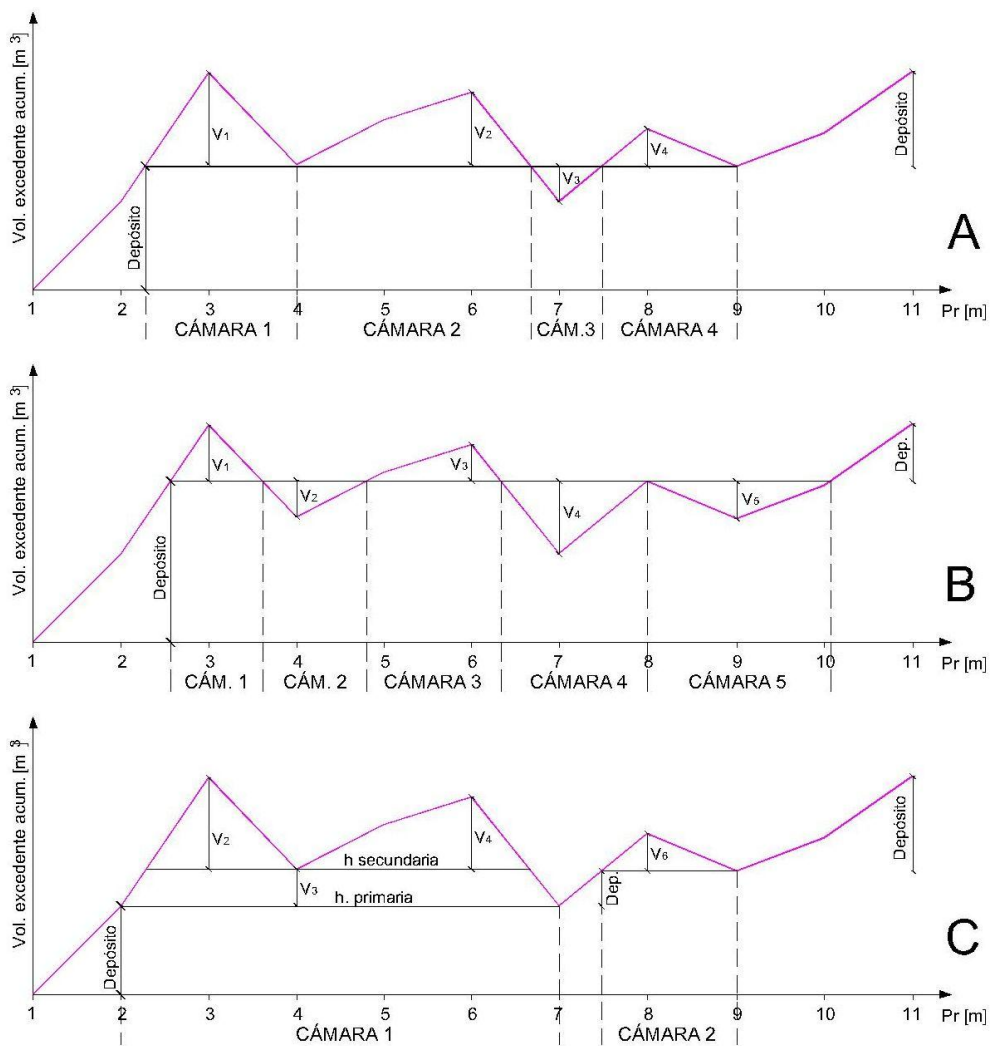


Figura 23

En el tramo completo siempre existe el mismo sobrante de suelo, es decir, hay depósitos. La diferencia entre A, B y C es la ubicación de las horizontales de distribución, que generan distintas cámaras con distintos transportes. Además, generan distinta distribución de los depósitos.

En el caso A, con la horizontal de distribución elegida, se forman 4 cámaras de trabajo compensadas y dos depósitos, uno al inicio y otro al final del tramo.

En el caso B, se forman 5 cámaras de trabajo compensadas y dos depósitos, como en el caso A, pero las cámaras tienen volúmenes diferentes al caso anterior.

En el caso C, hay dos horizontales de distribución. Se forman dos cámaras de trabajo compensadas, con la particularidad que la primera es una cámara compuesta la cual tiene una horizontal de distribución secundaria y además, entre las dos cámaras aparece un pequeño depósito adicional a los del principio y final del tramo.

Vamos a realizar la compensación del caso C.

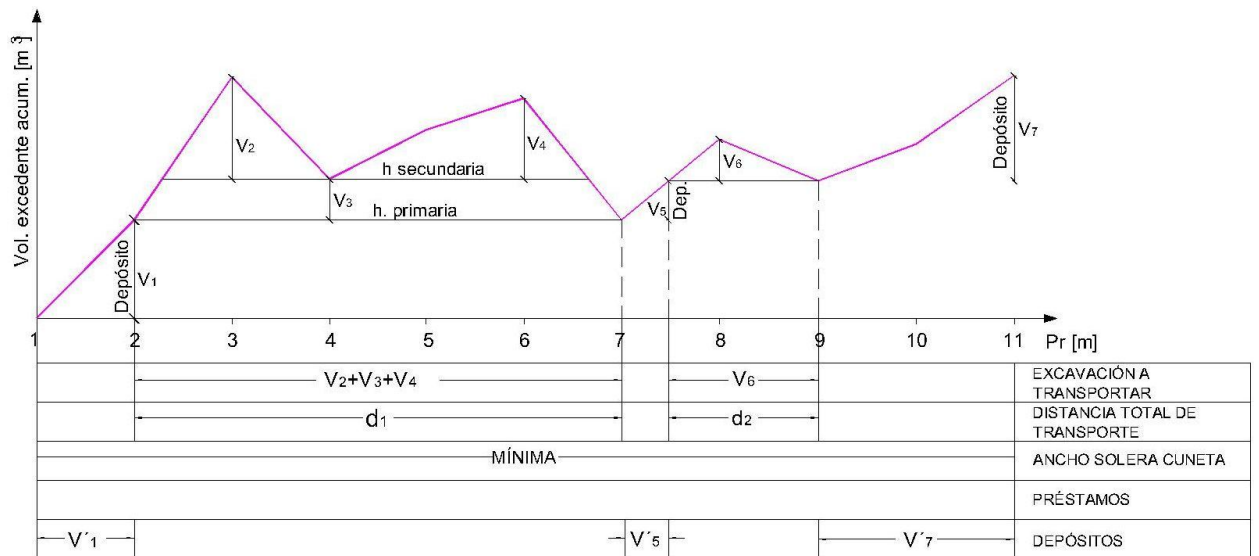


Figura 24

El volumen de la primera cámara de trabajo compensada será $(V_2 + V_3 + V_4)$.

Si tuviéramos únicamente la horizontal de distribución secundaria se formarían 2 cámaras de trabajo compensadas, con volúmenes V_2 y V_4 respectivamente. Entre ambas horizontales tenemos otro volumen que se compensa que, a los fines de interpretar la situación podemos pensar que trasladamos las partes que quedan comprendidas entre las horizontales y se forma otra pequeña cámara cuya ordenada es V_3 (Figura 25).

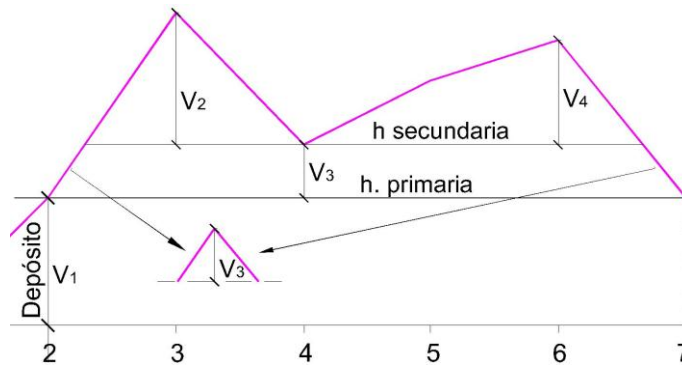


Figura 25

El cálculo de las DTT se realiza como ya se ha mencionado, calculando los momentos de transporte de cada cámara.

Los depósitos se colocan en el renglón correspondiente y se los llamó V'_1 , V'_5 y V'_7 ya que las respectivas ordenadas V_1 , V_5 y V_7 se dividieron por el coeficiente de transformación.

La segunda cámara de trabajo compensada tendrá un volumen V_6 .

8. Otras consideraciones

Necesitamos calcular la progresiva donde comienza la segunda cámara de trabajo compensada de la Figura 24. Este dato, además, nos sirve para obtener la base del triángulo que forma la cámara, necesario para calcular el momento de transporte.

Para ello aplicaremos la relación de triángulos (Figura 26) donde la única incógnita es X_2 . Un método similar se puede utilizar en el diagrama de áreas.

$$\frac{\Delta V}{X_1} = \frac{V_6}{X_2}$$

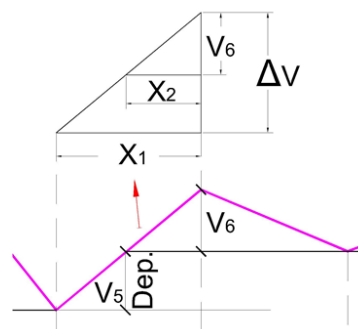


Figura 26

No hay diferencias en el cálculo del ítem transporte de suelos respecto de lo que ya se explicó para el diagrama de áreas.

El cálculo de los ítems "Terraplenes" y "Excavaciones" es más simple porque ya se tienen los volúmenes parciales calculados, por el método de la media de las áreas, faltando realizar la suma en la columna correspondiente de la Planilla de volúmenes.