



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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE

MOVIMIENTO DE SUELOS

Apunte de cátedra revisado y actualizado por:

Ing. Maria Alejandra Ferreyra
Ing. Sabina Fanelli

AÑO 2018

MOVIMIENTO DE SUELOS

1. Introducción

1.1. Conceptos generales

Se entiende por movimiento de suelos la técnica que trata sobre la formación de los terraplenes, desmontes y tareas afines, concernientes a una obra vial.

El movimiento de suelos comprende los siguientes trabajos:

a) MANIPULEO DE SUELOS

- Desbosque, destronque y limpieza del terreno
- Excavaciones
- Terraplenes
- Recubrimiento con suelo seleccionado
- Compactación especial
- Abovedamientos
- Preparación de la subrasante¹
- Construcción de banquetas
- Despedrado de laderas
- Recubrimiento de taludes y banquetas
- Conservación

b) TRANSPORTE DE SUELOS

El estudio del movimiento de suelos puede estructurarse en tres áreas:

- Descripción de las tareas, unidades de medida, forma de medición y cómputo de las mismas.
- Estudio y proyecto de las obras de terraplenes y desmontes de una obra vial.
- Técnicas de ejecución para la construcción de las referidas obras.

El presente apunte trata sobre lo expresado en el primer punto.

1.2. Desbosque, destronque y limpieza del terreno

Estos trabajos comprenden el desbosque, destronque y limpieza del terreno en todas las superficies destinadas a la construcción de las obras de un camino.

Este ítem admite dos alternativas de acuerdo a las características de la cobertura vegetal de la zona de camino:

“Desbosque y destronque”: se consideran estos trabajos cuando se requiere el corte, extracción y remoción de árboles, arbustos, troncos, raíces y demás vegetación de tipo leñoso que se presente en forma de bosque continuo.

“Limpieza del terreno”: son tareas que se ejecutan para remoción de plantas y arbustos no leñosos, pastos, cañaverales, malezas y demás vegetación herbácea, de modo que el terreno quede limpio y libre de toda vegetación y su superficie sea apta para iniciar las tareas posteriores.

¹ Se entiende por subrasante la superficie que sirve de asiento o fundación del paquete estructural del pavimento.

Incluye además la remoción de árboles aislados o pequeños grupos o filas de árboles de cualquier dimensión.

La superficie sometida a los trabajos así descritos se mide en hectáreas [ha].

1.3. Excavaciones

Estas tareas consisten en todas las excavaciones necesarias para la construcción del camino, e incluyen la ejecución de desmontes y faldeos; la construcción, profundización y rectificación de cunetas, zanjas y canales; la apertura de préstamos para extracción de suelos; la remoción de materiales para destape y tapado de yacimientos; la formación de rellenos; la extracción de materiales inadecuados en la zona donde se hará el camino; y todo otro trabajo de excavación necesario para la terminación del camino de acuerdo a lo previsto en el proyecto y a lo ordenado por la Supervisión de las obras.

Incluye asimismo la conformación, perfilado y conservación de todas las superficies formadas con los materiales no empleados en la construcción de las obras, o dejadas al descubierto por las excavaciones.

De acuerdo al tipo de material las excavaciones se clasifican en dos ítems:

- Excavación en roca: consiste en la excavación de toda formación geológica que pueda ser removida únicamente mediante el uso de explosivos o por la acción de un escarificador trasero aplicado a un tractor sobre orugas con una potencia neta mayor de 270 HP.
- Excavación común: consiste en la extracción de todo material que no corresponda a "Excavaciones en roca".

La unidad de medida es el metro cúbico [m³], medido en su posición originaria, y el volumen excavado se computa por el método de la media de las áreas.

Los perfiles transversales de base del terreno natural se levantan una vez realizada la limpieza del terreno.

Durante el desarrollo de la excavación, y cada vez que ésta pasa del material de una clasificación al material de otra, se levantan nuevos perfiles transversales a los efectos de calcular los volúmenes correspondientes a cada uno de los materiales, en los mismos lugares en que se levantaron los perfiles de base.

1.4. Terraplenes

Estas tareas consisten en la construcción de terraplenes con materiales aptos provenientes de los distintos tipos de excavaciones.

Estos trabajos incluyen la construcción y conservación de los terraplenes; la compactación de la base de asiento de los terraplenes; la conformación, perfilado y compactación; el riego con agua; y todo otro trabajo necesario para la correcta ejecución de los trabajos previstos en el proyecto.

De acuerdo al origen de los materiales empleados en la formación de los terraplenes, éstos pueden clasificarse según dos ítems:

- Terraplenes de roca
- Terraplenes de suelo común

Los terraplenes, cumpliendo con la densificación exigida en el proyecto, se miden en metros cúbicos en su posición definitiva [m³], aplicando el método de la media de las áreas. A tal fin, los perfiles transversales de base del terreno natural se deben levantar una vez realizada la limpieza del terreno y compactada la base de asiento del terraplén. Terminado el terraplén, o producido un cambio en la clasificación del mismo, se levantan perfiles transversales de la obra construida en los mismos lugares en que se levantaron los perfiles de base.

1.5. Recubrimiento con suelo seleccionado

Cuando la calidad del suelo de la subrasante no admite el apoyo del paquete estructural, se construye la subrasante mediante una o más capas de suelo seleccionado, de acuerdo a las previsiones del proyecto.

El material utilizado se extrae de yacimientos y debe cumplir con las condiciones de calidad especificadas en el proyecto.

La unidad de medida es el metro cúbico [m³] de suelo seleccionado colocado en su posición definitiva y en su estado de compactación final.

1.6. Compactación especial

Este trabajo consiste en la compactación de los suelos hasta tener el grado de densificación establecido en el proyecto.

Esta labor no se mide ni se paga ya que su costo se considera incluido en los ítems para los cuales se especifique este trabajo (ejemplos: terraplenes, recubrimiento con suelo seleccionado, etc.)

1.7. Abovedamientos

Se denomina abovedado a un camino precario que se ejecuta mediante la formación de la bóveda de una calzada con material extraído exclusivamente de las cunetas laterales.

En general estas obras se utilizan como caminos auxiliares durante la construcción de una ruta (accesos a yacimientos, desvíos provisorios, etc.)

La unidad de medida del abovedado es el metro lineal [m].

1.8. Preparación de la subrasante

Este trabajo consiste en la preparación de la subrasante para una construcción inmediata del pavimento, en un camino en el que con anterioridad se hayan realizado trabajos de movimiento de suelos.

Las tareas a realizar incluyen el escarificado, compactación, regado, conformación, perfilado y toda otra tarea necesaria para la correcta terminación de los trabajos.

Estas labores no reciben medición ni pago alguno pues su costo se considera incluido en el precio de los demás ítems del contrato.

1.9. Construcción de banquetas

Este trabajo consiste en la construcción de banquetas conforme a lo previsto en el proyecto de la obra.

De acuerdo al material empleado en la ejecución de las banquetas pueden preverse las siguientes situaciones:

- Si la ejecución de las banquetas se realiza con suelo común corresponde el empleo del ítem Terraplenes.
- Si la ejecución de las banquetas se realiza con suelo seleccionado corresponde el empleo del ítem Recubrimiento con suelo seleccionado.
- Si se trata de banquetas estabilizadas o pavimentadas, no se incluyen en el movimiento de suelos, y se emplea un ítem específico de acuerdo al material utilizado.

1.10. Despedrado de laderas

Este trabajo consiste en la limpieza del terreno ladera arriba de la traza del camino, quitando todos los materiales sueltos o débilmente sostenidos (piedras, troncos, etc.) que ofrezcan peligro de desmoronarse o desprenderse.

En general se prevé el despedrado de laderas con fuerte pendiente transversal en un ancho que puede variar entre 50 metros y 100 metros a partir del eje del camino.

La medición de estos trabajos se realiza en hectáreas [ha] medidas sobre el terreno a despedrar.

1.11. Recubrimiento de taludes y banquetas

Este trabajo consiste en el recubrimiento con suelo del primer horizonte, suelo pasto, tepes o siembra, de superficies expuestas a procesos erosivos. El material debe provenir de zonas cubiertas con césped bajo, denso y continuo, y ser de espesor uniforme y de formas y dimensiones regulares.

La unidad de medida es el metro cuadrado [m²].

1.12. Conservación

Este trabajo consiste en la conservación de todas las obras de movimiento de suelos, a partir de la fecha de terminación de cada parte de la obra y hasta la recepción definitiva, aún cuando el camino sea total o parcialmente liberado al tránsito público con anterioridad a dicha fecha.

Estas labores no reciben pago alguno pues su costo se considera incluido en el precio de los demás ítems del contrato.

1.13. Transporte de suelos

Consiste en el transporte de los materiales de las excavaciones hasta sus lugares de destino (terraplenes, rellenos, depósitos, etc.)

Se llama "Distancia total de transporte" (DTT) a la longitud comprendida entre una excavación y el lugar donde se coloque el producto de la misma.

Se llama "Distancia común de transporte" (DCT) a la longitud en la cual el transporte no recibe pago directo, pues su precio se encuentra incluido en los trabajos definidos como excavaciones.

Si la distancia total de transporte es mayor que la distancia común de transporte, la diferencia entre ellas se llama "Distancia excedente de transporte" (DET).

La definición de estos tres tipos de distancias de transporte se realiza a los efectos de llevar a la fase práctica la medición de los mismos. Es decir, se entiende como distancia común de transporte aquella distancia en la cual el movimiento de los suelos, dentro de las condiciones de trabajo y con los equipos usuales de laboreo, puede considerarse como manipuleo de los suelos e incluido dentro del ítem excavaciones.

De acuerdo a lo expresado, la distancia común de transporte varía de acuerdo a las condiciones de trabajo y a las posibilidades de utilización de los distintos equipos para el movimiento de suelos.

En general, para zonas de montaña, la distancia común de transporte está en el orden de los 100 metros. Para obras de poca magnitud, donde se emplean equipos viales de poca envergadura, se adoptan también distancias del valor mencionado.

En obras de relativa magnitud, desarrolladas en zonas llanas u onduladas, es usual adoptar 300 metros como distancia común de transporte.

La distancia excedente de transporte, medida en hectómetros, multiplicada por el volumen, en metros cúbicos de suelo transportado, da el número de unidades del ítem Transporte de suelos en hectómetros-metros cúbicos. El volumen de suelo transportado se mide en su posición originaria.

En aquellos casos en que no esté prevista la medición y pago del ítem Transporte de suelos, el costo de dicho transporte deberá ser tenido en cuenta en otros ítems de la obra, como por ejemplo en el ítem Excavaciones o en el ítem Terraplenes.

2. La sección transversal

Se denomina perfil transversal del terreno natural a la intersección de un plano vertical, perpendicular al eje del camino, con la superficie del terreno natural, en una progresiva determinada.

Tal perfil puede ser obtenido mediante dos procedimientos:

- Relevamientos de campo: Deben acotarse puntos en cantidad suficiente de manera tal que los perfiles reflejen lo más fielmente posible la topografía del terreno.
- Planos con curvas de nivel: La cota en el eje del perfil transversal corresponde a la tomada en campo mediante el relevamiento altimétrico del eje del camino. A ambos lados del eje se representan las sucesivas pendientes transversales obtenidas mediante el cociente entre las diferencias de cotas y de distancias entre las curvas de nivel.

Generalmente, por carecer de significación su incidencia como elemento variable en el cálculo de áreas de secciones transversales, no se relevan perfiles transversales cuando la pendiente transversal del terreno natural es inferior a 3% y el perfil puede asimilarse a una línea, considerándose entonces como una recta horizontal.

La distancia entre perfiles es función de la topografía del terreno, debiendo tomarse en cantidad tal que permitan representar realmente las irregularidades del terreno.

Los perfiles así obtenidos se representan en la misma forma que los observaría en el terreno un operador que recorre la traza en el sentido de las progresivas, ubicado en una posición anterior al perfil, y se dibujan correlativamente de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha.

Sobre los perfiles de terreno natural así obtenidos se representan las distintas secciones tentativas de los terraplenes y desmontes correspondientes a las sucesivas etapas del proyecto.

3. Valores de cómputo para secciones transversales

3.1. Coeficientes de transformación

Los coeficientes de transformación valoran la variación que experimenta el volumen de una determinada cantidad de material cuando pasa de un estado de densificación a otro.

Si con V_A y V_B se indican los volúmenes ocupados por una misma cantidad en peso de suelo en dos condiciones distintas de densificación A y B, se define como coeficiente de transformación C_{AB} correspondiente al pasaje de la condición A a la condición B, a la relación

$$C_{AB} = V_B / V_A$$

Las condiciones de densificación que más interesan en la práctica son las siguientes:

- In situ: del material en su posición originaria
- Suelto: en su estado de manipuleo
- Compactado: una vez finalizadas las operaciones de compactación

Estos coeficientes varían de acuerdo al estado natural y la profundidad del material in situ, al equipo empleado y la forma de trabajo durante el movimiento de suelos para el material suelto, y a la densificación exigida para el material compactado.

Tabla 1: Rango de coeficientes de transformación
RANGO DE COEFICIENTES DE TRANSFORMACIÓN

TIPO DE SUELO	DE CONDICIÓN	A CONDICIÓN		
		IN SITU	SUELTO	COMPACTADO
SUELO ARENOSO	IN SITU	1	1,07 - 1,15	0,85 - 0,95
	COMPACTADO	1,05 - 1,18	-	1
LOAM	IN SITU	1	1,20 - 1,35	0,80 - 0,90
	COMPACTADO	1,11 - 1,25	-	1
SUELO ARCILLOSO	IN SITU	1	1,35 - 1,55	0,83 - 0,90
	COMPACTADO	1,08 - 1,20	-	1
ROCA	IN SITU	1	1,50 - 1,90	1,20 - 1,60 (*)
	COMPACTADO	0,63 - 0,83	-	1

(*) Corresponden a valores de pedraplén. Si la roca se incorpora al terraplén el coeficiente disminuye hasta 1.

El coeficiente de transformación de la condición in situ a la compactada recibe el nombre de coeficiente de compactación, y el del estado in situ al suelto, coeficiente de esponjamiento.

$$C_{COMP} = V_{COMP} / V_{IN.SITU}$$

$$C_{ESP} = V_{SUELTO} / V_{IN.SITU}$$

3.2. Secciones con desmonte en roca y suelo común

En zonas donde se presentan excavaciones en roca se realizan sondeos en el eje y a ambos lados del mismo donde se prevé van a ir ubicadas las cunetas, y se transcriben los datos como se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Estas operaciones se denominan “determinación del piso de roca”.

Se define como “piso de roca” la línea que limita la capa superior de una formación rocosa. Esta línea puede recibir también la denominación de cama de roca.

Uniendo los límites entre roca y suelo común de cada sondeo se tienen diferenciados los dos tipos de excavación a computar.

Es evidente que el término roca definido para el movimiento de suelos no responde a las expresiones clásicas de la geología, la cual considera roca a toda asociación natural de minerales sin distinguir su dureza, diaclasamiento, estado de conservación, etc.

La definición de roca para el movimiento de suelos responde a un material de características tales que, para su remoción, haga necesario el uso de explosivos o de equipos viales que cumplan determinados requisitos mínimos.

Dentro de esta clasificación pueden entrar tanto rocas ígneas (granitos, basaltos, etc.), como rocas sedimentarias (areniscas, calizas, etc.). Pero también las rocas ejemplificadas pueden no caer dentro de la clasificación de roca si el estado de conservación es malo y pueden ser removidas con equipos livianos.

Además debe tenerse en cuenta que, en general, el cambio de un material a otro no se verifica a través de un plano perfectamente definido. A veces se produce una transición variable ya que el material superior de una formación rocosa puede estar meteorizado; otras, en cambio, se presentan formaciones mixtas de rocas y suelo común sobre un estrato rocoso.

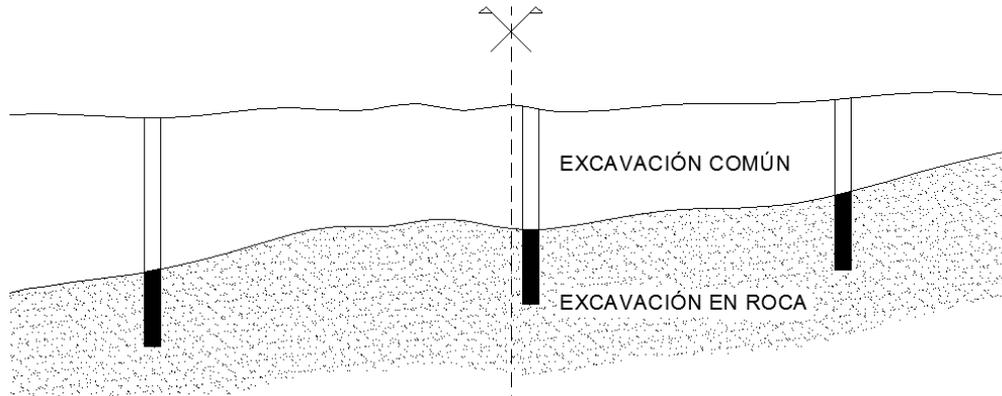


Fig. 1: Determinación del piso de roca

Estos conceptos permiten apreciar que la determinación del piso de roca para el cómputo del movimiento de suelos es una tarea sumamente difícil de realizar ya que son numerosas las variables a evaluar. Además, el profesional a cargo de la comisión debe tener suficiente experiencia como para detectar el tipo de roca, dureza y estado de conservación con relación al uso de explosivos o al empleo de equipos pesados con escarificador para el movimiento de suelos.

Además de determinar el límite superior de los estratos rocosos, debe detectarse la profundidad de dicho manto en aquellas formaciones que evidencien un reducido espesor del mismo (por ejemplo: coladas volcánicas, toscas, etc.)

Es importante una correcta clasificación de los suelos ya que si el volumen real de cada tipo de suelo movido durante la construcción de las obras supera el 20% de los valores estimados en el proyecto (Ley Nacional de Obras Públicas) ocasionará modificaciones en los precios unitarios de contrato.

El estudio y reconocimiento del tipo de suelo puede realizarse de acuerdo a los siguientes métodos:

Examen directo:

- | | |
|----------------|----------------------|
| -Cielo abierto | Pozos |
| | Trincheras |
| -Perforaciones | Barrenos |
| | Equipos perforadores |

Geofísicos:

- Prospección eléctrica
- Prospección sísmica

3.2.1. Examen directo

Es el método usualmente más empleado y permite realizar la clasificación de los suelos mediante la observación directa del material.

A. Cielo abierto

- Pozos: se realizan mediante pala, pico y barreta. Tienen limitada su profundidad debido a los derrumbes de las paredes, en especial en suelos arenosos. Este medio no permite perforar suelos consolidados ni rocas blandas, y sólo puede utilizarse en la excavación de suelos para examinar estratos inferiores.

La clasificación del material puede realizarse con base a informes geológicos de la región, al tipo de roca, y a la dureza que aquél ofrezca al ejecutar la excavación.

- Trincheras: se realizan con topadoras y permiten apreciar más fehacientemente la respuesta del material ante el trabajo de equipos viales.

B. Perforaciones

- Barrenos: el empleo de barrenos, ya sean manuales o mecánicos, está relegado a zonas donde haya una neta diferenciación entre suelo común y roca (por ejemplo: mantos de tosca, coladas volcánicas, etc.)

No pueden emplearse en suelos con piedras sueltas, rocas descompuestas o suelos consolidados ya que el barreno no puede perforar tales materiales. Además no pueden usarse en suelos arenosos ya que se produce el derrumbe de las paredes de la perforación.

- Equipos perforadores: se emplean generalmente para clasificar suelos en zonas donde se prevén grandes desmontes. Estos equipos permiten perforar cualquier tipo de formación geológica. La clasificación del material se realiza de acuerdo a la resistencia al avance de los trépanos y al examen de las muestras extraídas.

3.2.2. Métodos geofísicos

Constituyen un eficaz medio, tanto para definir límites de estratos rocosos como para determinar la dureza de los mismos.

C. Prospección eléctrica

Consiste en el estudio de algunas características físicas del subsuelo con base en la medición de la resistividad eléctrica de los suelos.

Las mejores respuestas de este método se logran cuando se opera en zonas de topografía poco movida, la estratificación es aproximadamente plana, y hay buenos contrastes de resistividad.

D. Prospección sísmica

La técnica de la prospección sísmica se basa en el estudio comparativo de las velocidades de propagación de ondas sonoras en distintos tipos de materiales.

Las velocidades sísmicas pueden ser correlacionadas con la clasificación de los suelos. Tales velocidades pueden indicar el tipo de material y su estado de alteración.

3.3. Caja de pavimento

Se denomina caja de pavimento al espacio ocupado por el paquete estructural de la calzada y banquina pavimentada o mejoradas.

Los espesores de una caja varían con la capacidad portante del suelo del núcleo del terraplén, oscilando generalmente entre 0,20 metros y 0,70 metros.

El diseño estructural del pavimento debe estar definido antes de realizar el cómputo del movimiento de suelos. El área de la caja se descuenta del área de terraplén en el caso que el camino se desarrolle sobre el terreno natural, y se suma al área del desmonte en el caso contrario.

3.4. Banquinas

En caso que las banquetas no sean diseñadas con suelo del terraplén, es decir, cuando sean de suelo seleccionado, materiales estabilizados, pavimentadas, etc., se considera incluida en el paquete estructural.

3.5. Gálibo de la obra básica en curva

En los perfiles transversales de la obra básica de un camino, correspondientes a tramos con curvas horizontales, se modifica el gálibo normal procediéndose a peraltarlos y adicionarles el sobreebancho correspondiente.

En el cálculo de las secciones transversales debe considerarse en cada perfil de un tramo en curva las áreas reales que surjan de la modificación del gálibo normal.

3.6. Coronamiento con barandas de defensa

En las secciones en que se proyecte la instalación de barandas de defensa, el ancho de coronamiento se ensancha a los efectos de empotrar las mismas.

Debe computarse en estos casos con el ancho de coronamiento ensanchado.

3.7. Limpieza del terreno

El desbosque, el destronque, y la limpieza del terreno en la superficie de ocupación de la obra básica, provoca un variable descenso del terreno natural (0,07m; 0,10 m; etc.) de acuerdo al tipo de suelo y a la cobertura vegetal. Este valor debe ser tenido en cuenta en el cálculo del volumen del movimiento de suelos, ya que el perfil transversal del terreno natural tomado para el proyecto debe coincidir con el que se releva para la medición de las obras una vez realizada la limpieza del terreno. El descenso del terreno natural mencionado afecta de diferente forma si se trata de una porción del perfil transversal que se encuentra en terraplén o en desmonte. En el primer caso, incrementa el volumen de terraplén a construir, y en los sectores de desmonte disminuye el volumen de suelo disponible.

3.8. Compactación de la base de asiento del terraplén

Después de la limpieza del terreno y antes de la construcción de los terraplenes, se compacta la superficie de asiento de estos últimos hasta obtener la densificación especificada. Generalmente se exige esta operación cuando la altura de los terraplenes es inferior a dos metros, y se realiza sobre un espesor de 0,20 metros.

Esta compactación provoca el descenso de la base de asiento, espacio que debe llenarse con suelo de reposición.

3.9. Escalonamiento de la base de asiento del terraplén

Si el terreno natural tiene una pendiente transversal superior al 30%, la base de asiento debe conformarse en escalones, debiendo computarse y pagarse el material excavado como excavación, y realizarse la medición del área de terraplén a partir de la línea de escalonamiento.

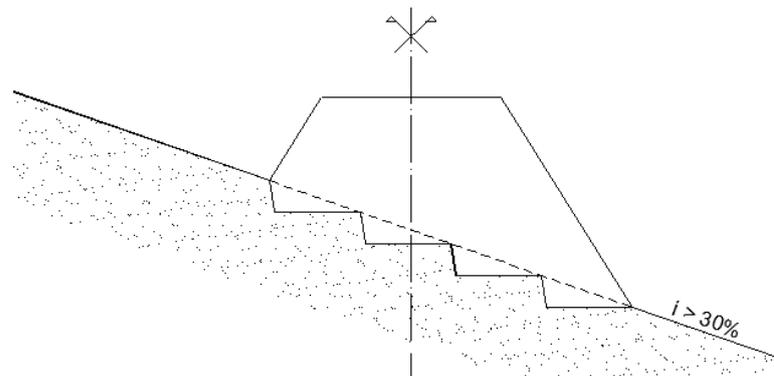


Fig. 2: Escalonamiento de la base de asiento del terraplén

La base de asiento así conformada debe ser compactada cumpliendo las exigencias establecidas.

3.10. Materiales inadecuados en la base de asiento del terraplén

Estos suelos deben ser retirados y reemplazados por otros aptos. El material extraído se computa como excavación y va a depósito fuera de la zona de ocupación de las obras del camino, pues no son suelos utilizables en la conformación de terraplenes.

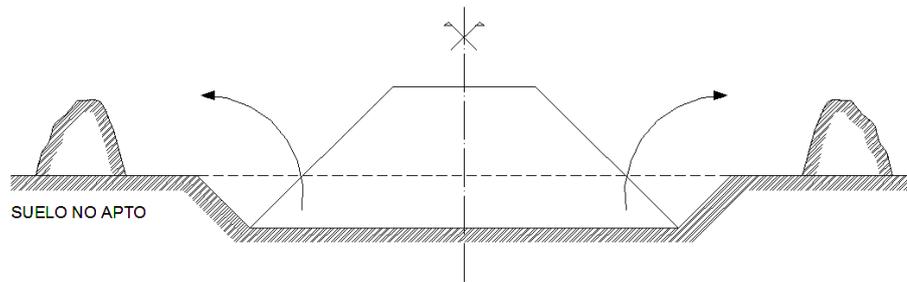


Fig. 3: Reemplazo de materiales inadecuados

3.11. Desmante en roca

Cuando las superficies de rodamiento corresponden a calzadas naturales o enripiadas, en desmontes en roca debe preverse una excavación adicional que contemple ser rellenada con suelo o ripio según el caso que corresponda, a fin de obtener uniformidad en la superficie de rodamiento.

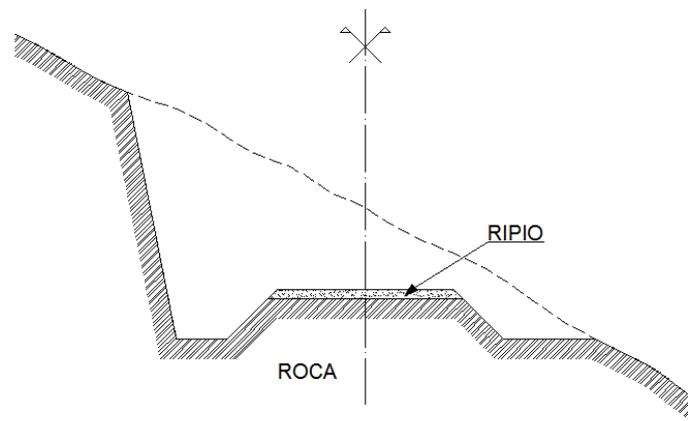


Fig. 4: Desmante en roca

4. Cómputo de secciones transversales

4.1. Métodos de cómputo

Se presentan dos métodos de cómputo de superficies de secciones transversales:

- Método analítico: mediante la descomposición de las secciones en figuras geométricas y cálculo del área de cada una utilizando las fórmulas correspondientes.
- Método gráfico: utilizando instrumentos que permiten medir gráficamente las áreas.

4.2. Método analítico

4.2.1. Generalidades

La sección transversal queda determinada por la intersección de la poligonal que representa el terreno natural y el gálibo de la obra a construir.

En la Fig. 5 quedan definidas dos secciones en desmonte y una en terraplén. Se trata de tres polígonos irregulares cuyas superficies pueden ser calculadas descomponiendo las figuras en secciones regulares, o bien por el método de coordenadas ya que se tienen poligonales referidas a un sistema de ejes ortogonales.

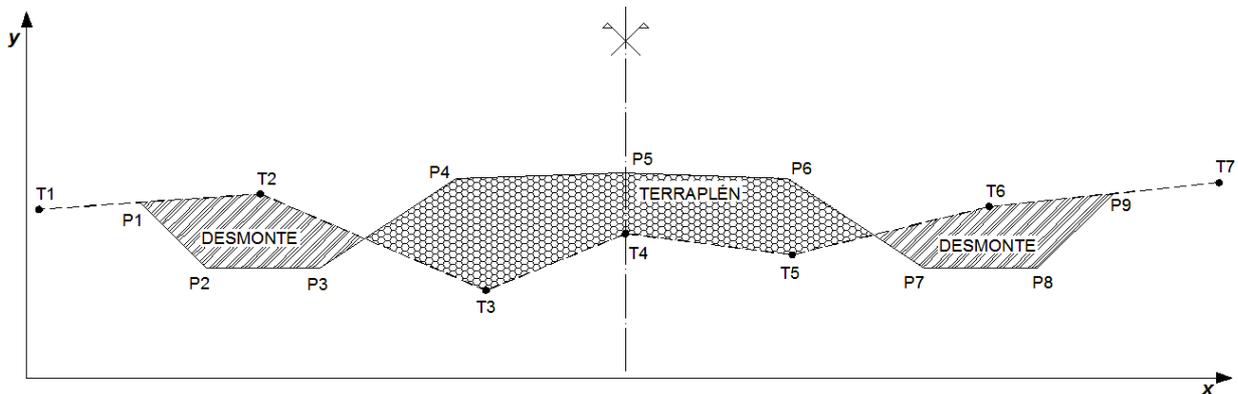


Fig. 5: Sección transversal

4.2.2. Fórmulas de secciones simplificadas

Para ciertas condiciones de proyecto las secciones transversales pueden simplificarse asimilándolas a figuras geométricas sencillas que permitan una resolución expeditiva del cálculo de superficie.

El caso más común es el de asimilar el terreno natural a una línea horizontal. Esta hipótesis puede ser admitida siempre que la pendiente transversal sea de escaso valor y el eje de la traza se desarrolle sobre terreno natural uniforme. Esta hipótesis carece de validez cuando el camino se proyecta sobre una obra básica existente.

4.2.2.1. Secciones en terraplén

Parte de la hipótesis que el terreno natural es sensiblemente uniforme y mantiene la misma pendiente transversal en toda la zona de ocupación de la obra básica.

El área de la sección transversal ABRCD puede ser presentada de la siguiente manera:

$$A_t = ABRCD = AOD - BOC + BCR$$

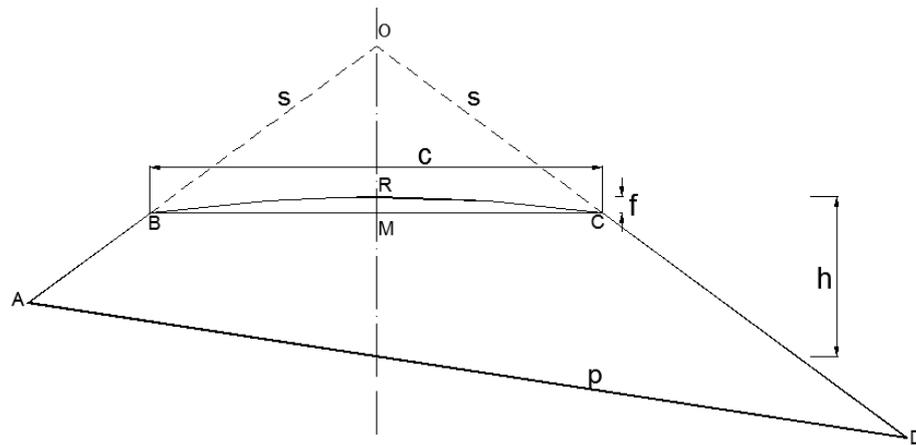


Fig. 6: Sección simplificada

La superficie BCR corresponde a la de un segmento parabólico, y para valores de $f/2c$ de pequeña magnitud como se presentan en las obras viales, la expresión del área está dada por:

$$A_{BCR} = \frac{2}{3} cf$$

siendo: f : flecha del coronamiento
 c : ancho de coronamiento

Si se denomina: p : pendiente transversal del terreno natural, en m/m
 s : pendiente del talud del terraplén, en m/m ($s = \text{tg} OBM$)
 h : altura del terraplén, en m

se puede expresar:

$$At = \frac{s[1/2cs + (h-f)]^2}{s^2 - p^2} - \frac{1}{4}c^2s + \frac{2}{3}cf$$

Resultando $At = f(h, p; [s; c])$

Los valores de s y c varían según la altura del terraplén. Cuando ésta toma valores elevados, con el fin de reducir el movimiento de suelo en terraplén se aumenta la pendiente del talud y, a fin de proveer espacio suficiente para la colocación de baranda de seguridad, se aumenta el ancho de coronamiento.

Como se ve, c y s pueden asumir escasos valores en todo un proyecto vial, no así p y h que varían para cada sección transversal.

Si la pendiente transversal del terreno natural es menor de 3% puede despreciarse el valor de la pendiente en la fórmula anterior, considerando el terreno natural como horizontal, siempre que éste pueda asimilarse a una recta (no es posible en trazados sobre caminos existentes).

En la Fig. 7 se muestra gráficamente el error (superficie rayada) que se comete haciendo la suposición anterior.

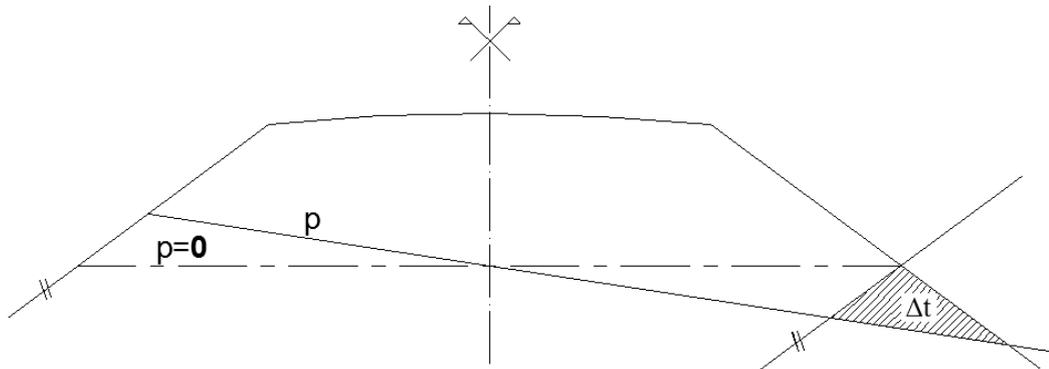


Fig. 7: Error en sección simplificada

Cuando $h < (f + 1/2cp)$ los errores se distorsionan pues la fórmula aproximada da un perfil en terraplén, mientras que en realidad es un caso de perfil en terraplén-desmonte.

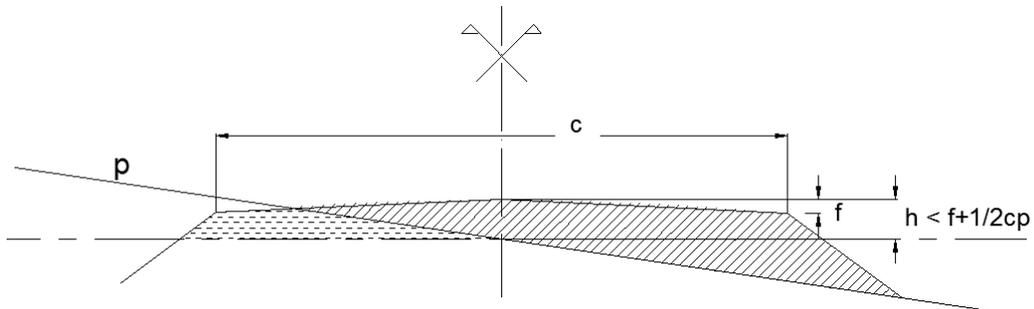


Fig. 8: Sección transversal para $h < (f + 1/2cp)$

Fórmula aproximada considerando el terreno natural horizontal:

$$At = \frac{2}{3}cf + c(h-f) + \frac{(h-f)^2}{s}$$

resultando $At = f(h, [s; c])$

4.2.2.2. Secciones en desmorte

En este caso el perfil queda determinado generalmente con la construcción de cunetas con anchos de solera mínimos a lo largo de todo el desmorte, ya que se presentan excesos de disponibilidad de suelos.

En forma similar al caso anterior se puede considerar el terreno natural como horizontal cuando la pendiente transversal es inferior a 3%.

La sección transversal se considera como la suma de:

$$A_d = A_{BIK} + BCDE + FGHI - ERF$$

$$A_d = \left[(c + 2a) + 2(d-f) \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) + \frac{(h+f)}{s_2} \right] (h+f) + \left[2a + (d-f) \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) \right] (d-f) - \frac{2}{3}cf$$

siendo: s_1 pendiente del talud, en m/m
 s_2 pendiente del contratalud, en m/m

$$\text{resultando } A_d = f\{(d-f); h; [s_1; s_2; c; a]\}$$

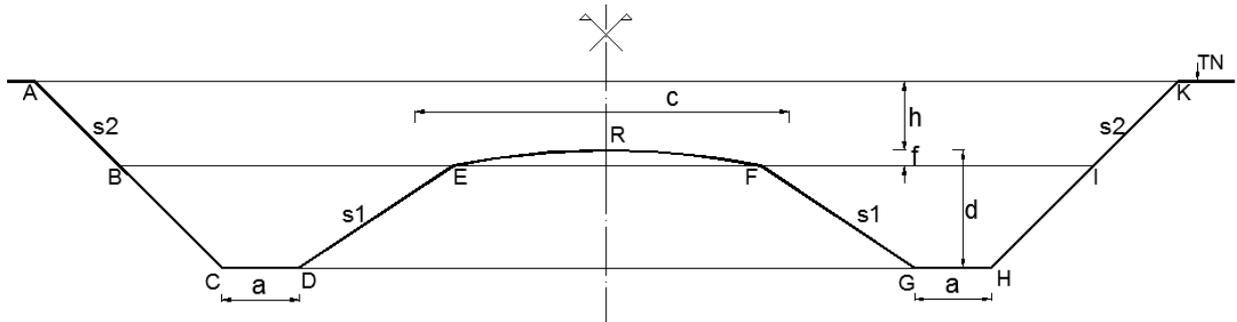


Fig. 9: Secciones en desmonte – Pendiente transversal nula

En esta expresión se presentan dos variables, h y $(d-f)$, puesto que c , s_1 , s_2 y a pueden asumir escasos valores en todo un proyecto vial.

El caso de desmontes en zonas con pendientes transversales inferiores a 3% se presenta pocas veces, ya que con esa pendiente las exigencias del diseño geométrico altimétrico son cubiertas ampliamente con terraplenes.

4.2.2.3. Secciones de cuneta mínima

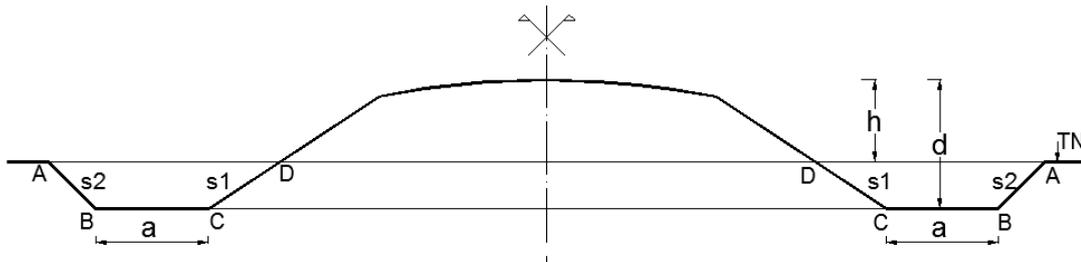


Fig. 10: Sección de cuneta mínima

$$Ac_{\min} = 2 \left[a + \left(\frac{d-h}{2} \right) \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) \right] (d-h)$$

$$\text{Resultando } Ac_{\min} = f\{(d-h); [s_1; s_2; a]\}$$

Se observa que para un determinado perfil tipo de obra, siendo a el ancho de solera mínima determinado por las condiciones del proyecto, la sección de la cuneta mínima es función exclusiva de $(d-h)$, profundidad de la misma con respecto al terreno natural.

4.2.2.1. Secciones de cuneta máxima

En la Fig. 11 se presenta un perfil transversal tipo donde B_1 y B_2 son zonas mínimas reservadas para obras accesorias de la carretera (ubicación de servicios públicos, veredas, embellecimiento, etc.)

Las superficies máximas disponibles para extracción de suelos estarán determinadas por el remanente entre la zona total de camino y la suma de las zonas reservadas y de ocupación de los terraplenes.

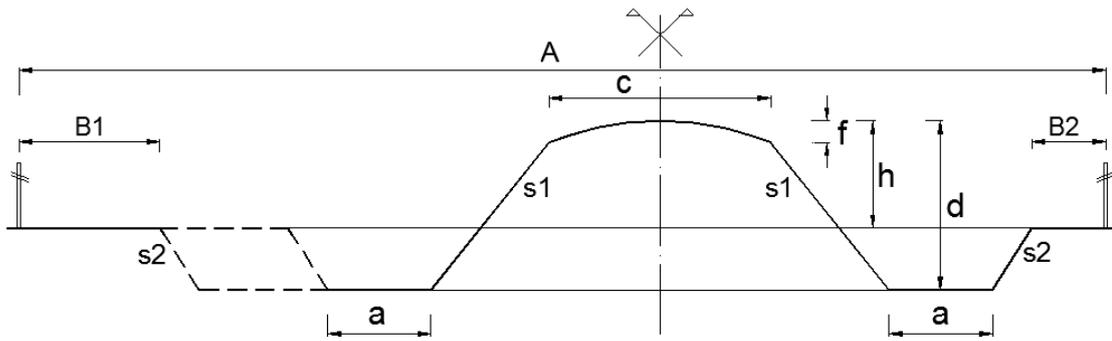


Fig. 11: Sección de cuneta máxima

Las disponibilidades máximas de suelo para construcción de terraplenes en una sección dada se denominan cuneta máxima.

Llamando $B = B_1 + B_2$

$$Ac_{m\acute{a}x} = \left[A - B - c - \frac{2}{s_1}(h-f) \right] (d-h) - \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) (d-h)^2$$

resultando $Ac_{m\acute{a}x} = f\{h, (d-h), [c, s_1, s_2]\}$

Se observa entonces que los valores de cuneta máxima para un determinado proyecto son función exclusiva de h (altura del terraplén sobre el terreno natural), y de $(d-h)$ (profundidad de la cuneta).

5. Cálculo de volúmenes

5.1. Volumen del prismoide

5.1.1. Fórmula exacta

Sean tres ejes ortogonales x, y, z , y en el plano xOy se apoya la base F_0 del prismoide en estudio. A una distancia d , y sobre un plano paralelo al anterior, se encuentra la otra base F_d del prismoide. Sea NM la generatriz que, apoyándose en el contorno de las bases genera el cuerpo en estudio. Si se corta el cuerpo así formado con un plano paralelo al de las bases a una distancia z del origen O se obtiene la sección F_z indicada en la Fig. 12.

Las proyecciones de la generatriz NM sobre los planos yOz y xOz serán $N''M''$ y $N'M'$ respectivamente.

Si se llama x_0 e y_0 a las coordenadas del punto genérico N del contorno de la base F_0 , las coordenadas de un punto cualquiera de la generatriz NM serán:

$$\begin{cases} x_z = x_0 + z \times \operatorname{tg}\alpha \\ y_z = y_0 + z \times \operatorname{tg}\beta \end{cases}$$

Si $\operatorname{tg}\alpha = m$ $\operatorname{tg}\beta = n$

Resulta $\begin{cases} x_z = x_0 + z \times m \\ y_z = y_0 + z \times n \end{cases}$

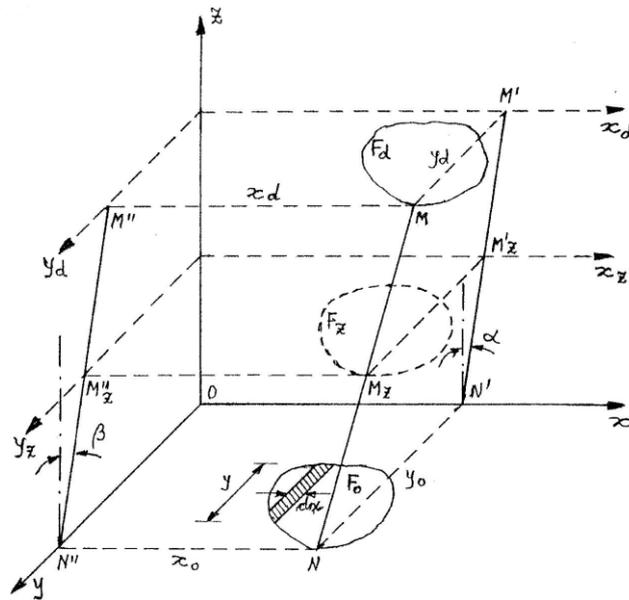


Fig. 12: Volumen del prismoide

El área de una sección cualquiera F_z será:

$$F_z = \int (y_0 + z \times n) \partial(x_0 + z \times m)$$

$$F_z = \int y_0 \partial x_0 + z \int (n \partial x_0 + y_0 \partial m) + z^2 \int n \partial m$$

Si $\int y_0 \partial x_0 = C$

$$\int (n \partial x_0 + y_0 \partial m) = B$$

$$\int (n \partial m) = A$$

se tendrá una ecuación del siguiente tipo:

$$F_z = Az^2 + Bz + C$$

Es decir que el área de una sección transversal del prismoide a la distancia z del origen es una función de segundo grado de la variable z .

El volumen del cuerpo en estudio será:

$$V = \int_{z=0}^{z=d} F_z \partial z = \int_{z=0}^{z=d} (Az^2 + Bz + C) \partial z$$

Integrando

$$V = \left[\frac{A}{3} z^3 + \frac{B}{2} z^2 + Cz \right]_0^d$$

$$V = \frac{A}{3}d^3 + \frac{B}{2}d^2 + Cd$$

$$V = \frac{d}{6}(2Ad^2 + 3Bd + 6C)$$

Si se llama F_m a la superficie de una sección para $z = d/2$, los valores de F_0 , F_m y F_d serán:

$$F_0 = C$$

$$F_m = A\frac{d^2}{4} + B\frac{d}{2} + C$$

$$F_d = Ad^2 + Bd + C$$

Efectuando la siguiente suma: $F_0 + F_d + 4F_m = 2Ad^2 + 3Bd + 6C$

se tiene que dicho resultado es igual a la expresión $(2Ad^2 + 3Bd + 6C)$ y reemplazando en la misma:

$$V = \frac{d}{6}(F_0 + F_d + 4F_m)$$

Si $F_m = \frac{F_0 + F_d}{2}$

resulta $V = \frac{d}{6}\left(F_0 + F_d + 4\frac{F_0 + F_d}{2}\right)$

es decir $V = \frac{d}{6}(3F_0 + 3F_d) = \frac{d}{2}(F_0 + F_d) = \frac{F_0 + F_d}{2}$

Pero $F_m = \frac{F_0 + F_d}{2}$ sí y sólo sí $A = n\partial m = 0$

lo cual implica que $n = 0$ (si $\operatorname{tg}\beta = 0$ generatriz // al plano xOz)

ó $\partial m = 0$ (si $\operatorname{tg}\alpha = \text{cte.}$ generatriz // a sí misma).

5.1.2. Volumen por la media de las áreas

En general como método operativo práctico y a los efectos de simplificar el cómputo de los volúmenes de suelo, se adopta como fórmula del sólido comprendido entre dos secciones transversales la siguiente expresión, denominada media de las áreas:

$$V = d\frac{(F_0 + F_d)}{2}$$

teniendo los términos los mismos significados expresados anteriormente.

5.1.3. Errores producidos

En forma gráfica, el error cometido por la simplificación anterior se ve en las siguientes secciones transversales, en las cuales el terreno natural es uniforme y conserva la misma pendiente transversal:

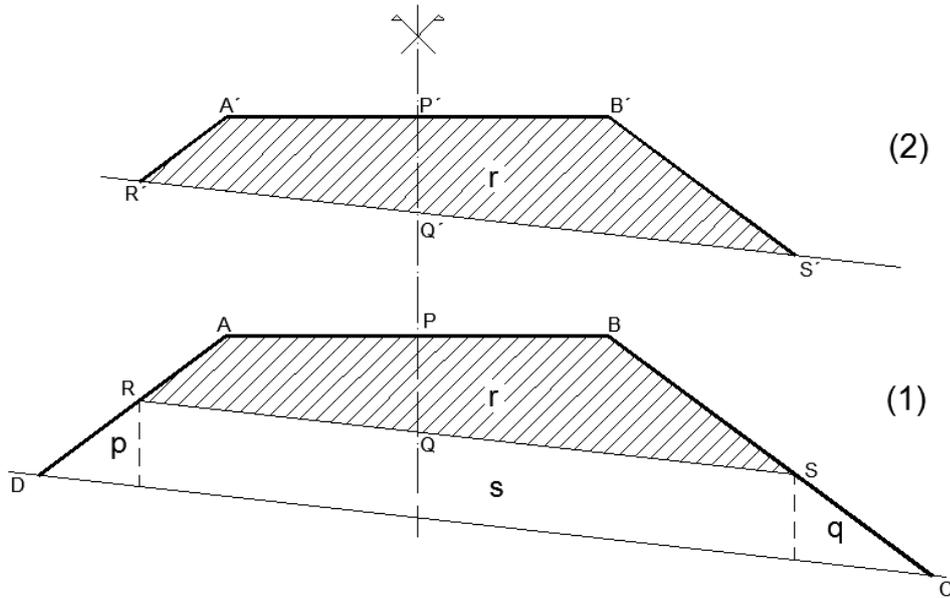


Fig. 13: Secciones transversales

En la sección (1) a partir de una altura de terraplén igual a $P'Q'$, se traza una recta RS paralela a $R'S'$, obteniendo el área $ABSR = A'B'S'R' = r$

La sección remanente $RSCD$ puede considerarse integrada por las áreas s, p y q .

La superficie r entre las dos secciones se mantiene constante, s varía linealmente, p y q varían según una ley cuadrática.

El volumen exacto del sólido entre ambas secciones será:

$$V_{real} = rd + s\frac{d}{2} + (p+q)\frac{d}{3}$$

$$V_{real} = d\left(r + \frac{s}{2} + \frac{p}{3} + \frac{q}{3}\right)$$

$$V_{real} = \frac{d}{6}(6r + 3s + 2p + 2q)$$

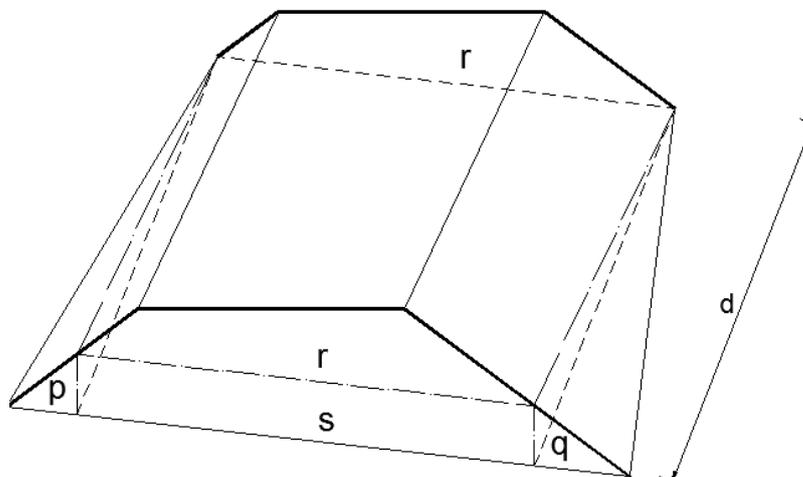


Fig. 14: Volumen de terraplén

El volumen obtenido por el método de la media de las áreas será:

$$V_{aprox} = (r + r + s + p + q) \frac{d}{2}$$

$$V_{aprox} = \frac{d}{6} (6r + 3s + 3p + 3q)$$

El error que se comete es $\Delta V = -\frac{d}{6}(p + q)$

5.2. Volumen en alineamientos curvos

En zonas de camino donde el eje se desarrolla en curva las secciones transversales consecutivas no son paralelas, por lo tanto el sólido que delimitan no puede considerarse como prismoide.

El cálculo debe realizarse entonces aplicando el teorema de Gulding en base al cual el volumen de un sólido de rotación es igual al producto entre la superficie generatriz y el desarrollo del arco descrito por el baricentro de dicha sección.

En forma similar a la ya usada, puede considerarse como sección generatriz aproximada el área media de las secciones extremas. $F_g = (F_1 + F_2)/2$

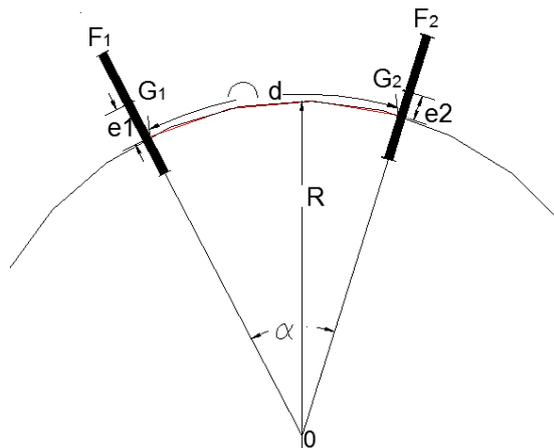


Fig. 15: Secciones transversales en alineamientos curvos

El volumen del sólido será:

$$V = \frac{F_1 + F_2}{2} R' \alpha$$

donde: $R' = \frac{[(R + e_1) + (R + e_2)]}{2} = R + \frac{(e_1 + e_2)}{2}$

α : ángulo al centro, expresado en radianes, entre las dos secciones consideradas

Reemplazando $V = \frac{F_1 + F_2}{2} \left[\alpha R + \alpha \frac{(e_1 + e_2)}{2} \right]$

Siendo $\alpha R = d$ distancia entre ambas secciones

Resulta
$$V = \frac{F_1 + F_2}{2} d \left[1 + \frac{(e_1 + e_2)}{2R} \right]$$

El error que se comete al calcular el volumen como la media de las áreas por la distancia entre las secciones es:
$$\Delta V = \frac{(F_1 + F_2)}{2} d \frac{(e_1 + e_2)}{2R}$$

5.3. Cálculo de volúmenes de movimiento de suelos

5.3.1. Diagrama de áreas

El diagrama de áreas es una poligonal construida sobre dos ejes ortogonales, en los cuales las abscisas representan las progresivas del eje y las ordenadas el área de la sección transversal correspondiente a cada perfil relevado. Por convención se adoptan como positivos los valores de desmonte (disponibilidades de suelo) y como negativos los de terraplén (necesidades de suelo).

Considerando como método de cálculo de volúmenes el de la media de las áreas, la superficie del diagrama de áreas entre dos secciones determinadas representa el volumen del sólido comprendido entre ambas.

5.3.2. Construcción del diagrama de áreas

5.3.2.1. Casos particulares

a) Secciones homogéneas en terraplén o en desmonte

En las progresivas de cada sección transversal, y en una escala previamente establecida, se representan como ordenadas los valores de las áreas respectivas. Uniendo entre sí los extremos de tales ordenadas queda graficado el diagrama de áreas. La superficie del mismo, entre dos progresivas determinadas, corresponde al volumen del sólido considerado.

Sean D_1 , D_2 y D_3 las respectivas áreas en desmonte de las secciones 1, 2 y 3 ubicadas entre sí a las distancias relativas d_1 y d_2 . El volumen del sólido entre los puntos 1 y 3 será:

$$V_D = \frac{1}{2}(D_1 + D_2)d_1 + \frac{1}{2}(D_2 + D_3)d_2$$

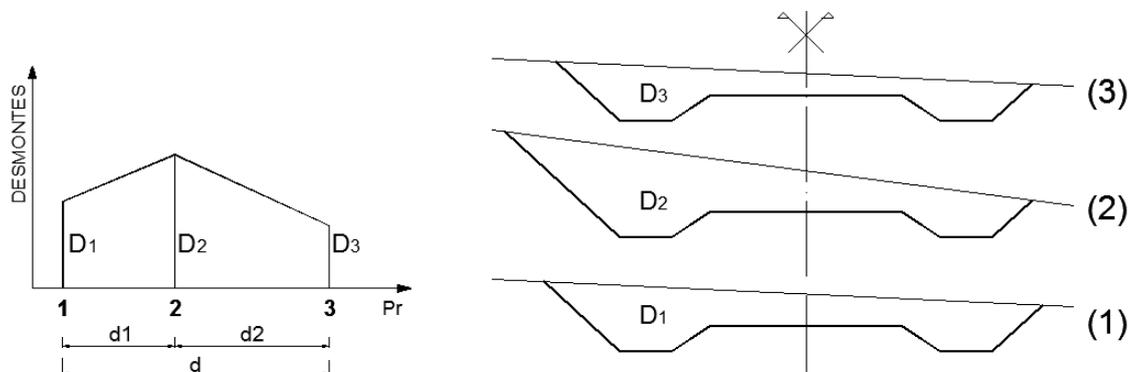


Fig. 16: Secciones homogéneas en desmonte

b) Secciones homogéneas de terraplén a desmorte

Al calcular volúmenes entre dos perfiles consecutivos, uno en terraplén y el otro en desmorte, se deben considerar dos clases de volúmenes: uno, totalmente en terraplén entre el primer perfil y el punto donde el terraplén se hace cero, y otro en desmorte desde ese mismo punto hasta el segundo perfil considerado en desmorte.

El pasaje de terraplén a desmorte estará definido por una línea que tendrá formas variadas de acuerdo a la topografía del terreno.

Dentro de las tolerancias aceptables para este tipo de cálculo se puede considerar, a los efectos de simplificar el mismo, que el pasaje de terraplén a desmorte o viceversa se realiza sobre un plano ideal normal al eje del camino, el cual lo intercepta en un punto llamado punto de paso longitudinal, ubicado a distancias de las secciones transversales proporcionales a sus respectivas áreas.

Sean las áreas T_1 y D_1 , en terraplén y desmorte respectivamente, de los perfiles 1 y 2 ubicados entre sí a la distancia d . Representadas gráficamente las áreas y uniendo sus extremos, la recta así definida corta el eje de las abscisas en P, llamado punto de paso longitudinal.

Las distancias d_1 y d_2 cumplen la siguiente condición:

$$\frac{T_1}{d_1} = \frac{D_2}{d_2}$$

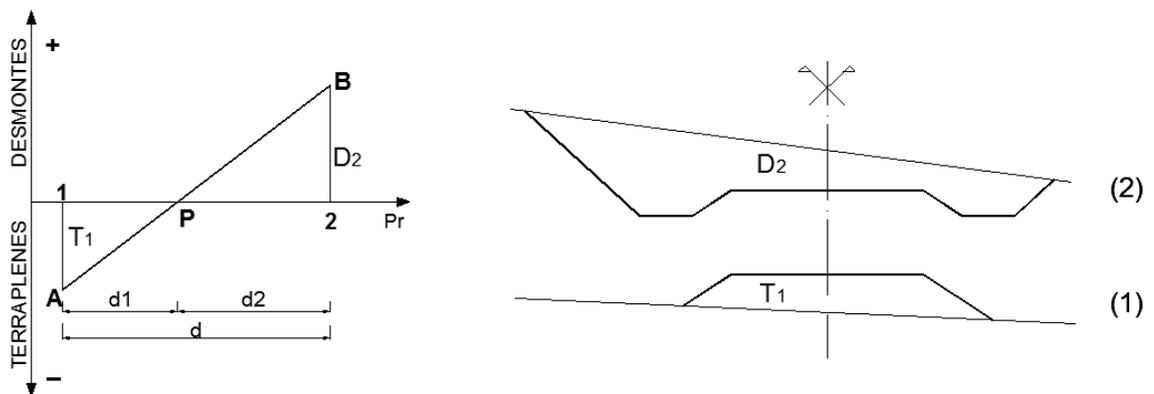


Fig. 17: Secciones homogéneas de terraplén a desmorte
Determinación del punto de paso

Aplicando el método de la media de las áreas se obtienen los volúmenes correspondientes:

$$V_T = \frac{1}{2} T_1 d_1$$

$$V_D = \frac{1}{2} D_2 d_2$$

que estarán representados respectivamente por las áreas de los triángulos $1PA$ y $PB2$.

c) Secciones mixtas a homogéneas

Sea el caso de la Fig. 18, donde uno de los perfiles es mixto.

Si por el punto de paso transversal T del perfil 1 se hace pasar un plano vertical YY paralelo al eje del camino, su intersección con la sección en desmonte 2 la divide en dos áreas D'_2 y D''_2 .

Siguiendo el criterio expuesto en los puntos anteriores se puede considerar al sólido total entre las dos secciones 1 y 2 como integrado por el volumen en desmonte entre las áreas D_1 y D'_2 , y el volumen en terraplén y desmonte entre las áreas T_1 y D''_2 .

El diagrama de áreas queda integrado de la siguiente manera:

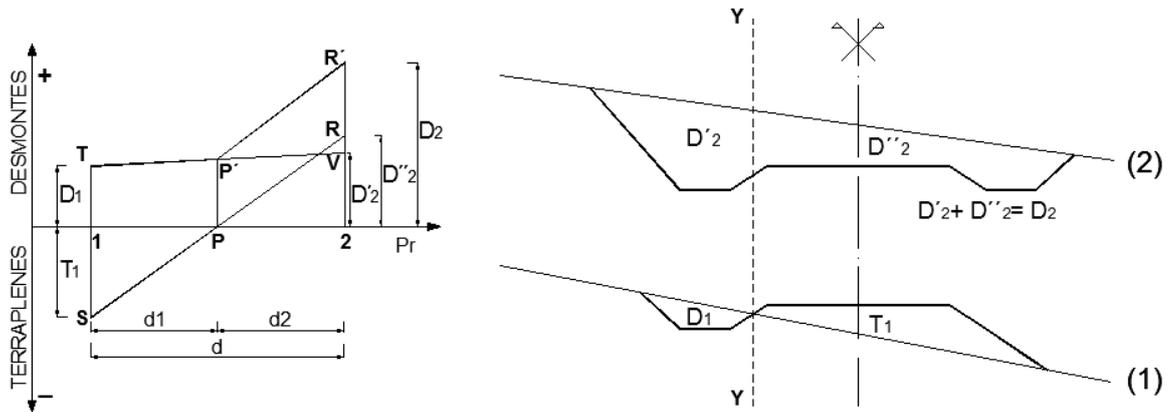


Fig. 18: Secciones mixtas a homogéneas

Ubicados los puntos 1 y 2 sobre el eje de las abscisas de acuerdo a sus respectivas progresivas, se grafica como ordenada en 1, en sentido negativo por tratarse de terraplén, el área T_1 . En 2 se dibuja la correspondiente al área D''_2 en desmonte. Uniendo S con R se determina el punto de paso longitudinal P . La superficie del triángulo $1PS$ corresponde, de acuerdo a la media de las áreas, al volumen de terraplén entre las secciones 1 y 2, y el área del triángulo $PR2$ al volumen del desmonte a la derecha del plano YY .

Llevando ahora sobre 1 y 2 las ordenadas correspondientes a las áreas D_1 y D'_2 respectivamente, y uniendo T con V , el área $1TV2$ representará el volumen en desmonte restante.

Si a partir de V se adiciona el área parcial D''_2 de la sección 2 y se une R' con P' se obtiene el triángulo $P'R'V$ de área igual al $PR2$ por tener igual base y altura. El volumen total del desmonte estará expresado por el polígono $1TP'R'2$.

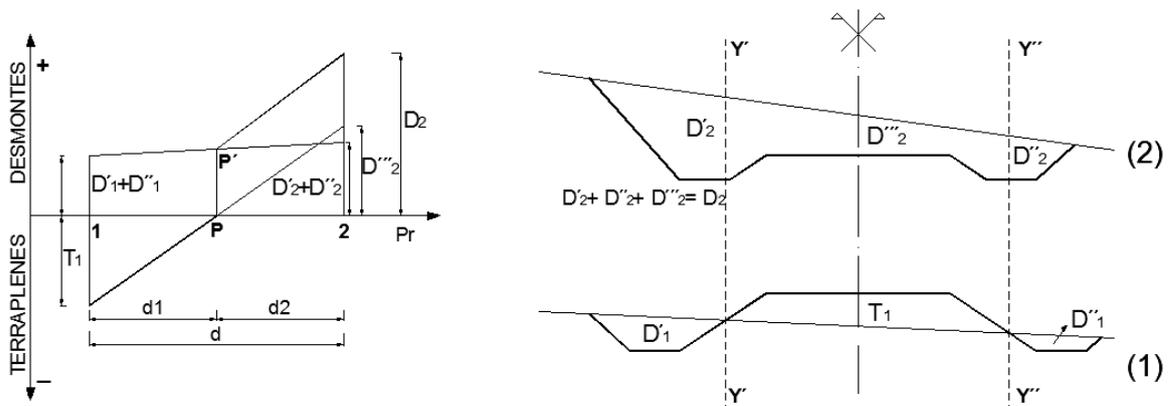


Fig. 19: Diagrama de áreas secciones mixtas a homogéneas

En el caso de la Fig. 19, en la cual la sección 1 presenta dos puntos de paso transversales, se realiza la misma operación anterior pero con dos planos $Y'Y'$ e $Y''Y''$.

Sumando las áreas D'_1 y D''_1 del perfil 1, y D'_2 y D''_2 del perfil 2, se construye el diagrama de áreas en la forma ya expresada.

d) Secciones mixtas

En este caso se aplica la media de las áreas para secciones parciales de igual naturaleza delimitadas con rectas trazadas por los puntos de paso transversales de ambos perfiles. La construcción del diagrama de áreas se realiza considerando las áreas en desmonte D_1 y D'_2 , las en terraplén T''_1 y T_2 , y las T'_1 en terraplén y D''_2 en desmonte.

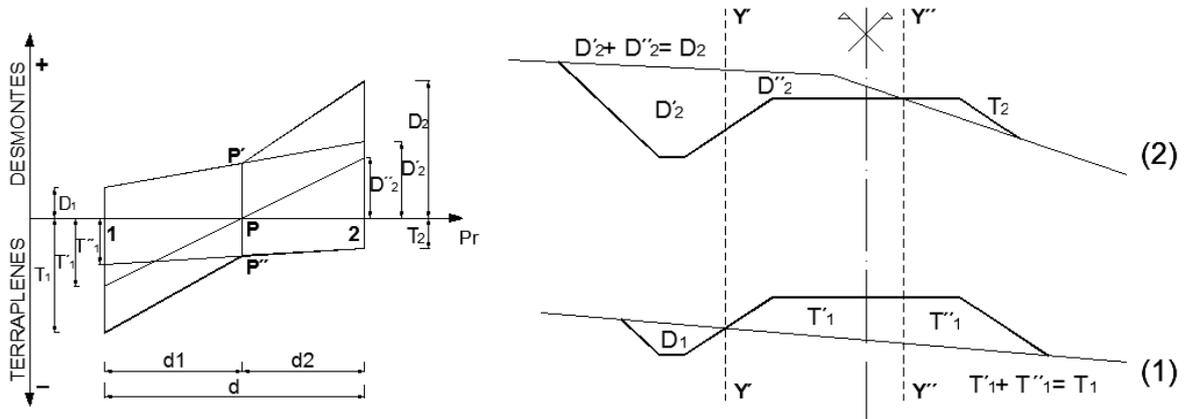
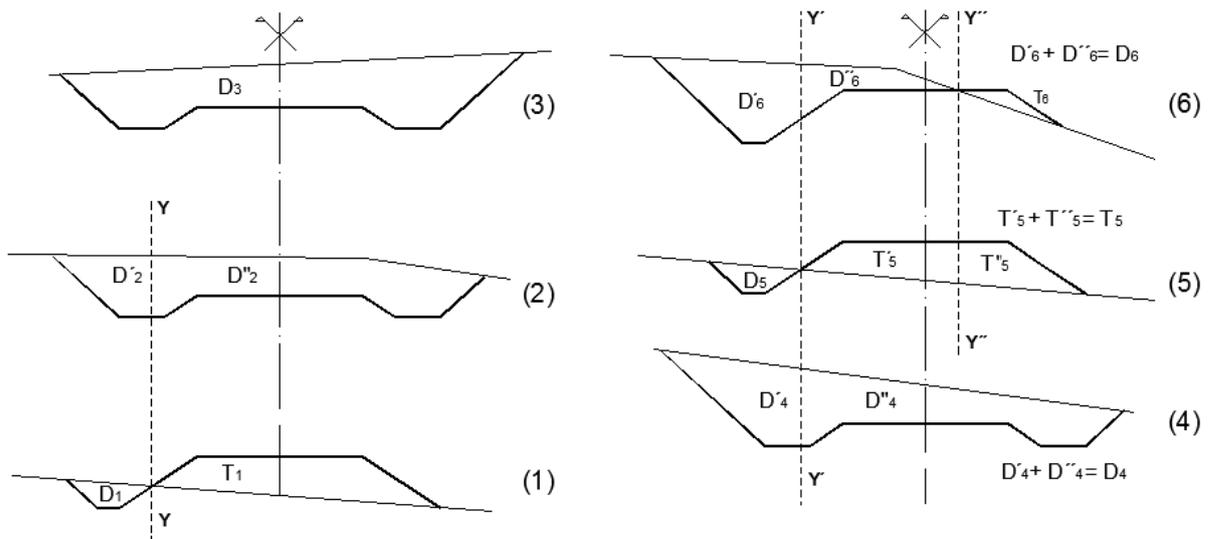


Fig. 20: Diagrama de áreas entre secciones mixtas

5.3.2.2. **Caso general**

Con los métodos descritos para los distintos casos particulares se puede construir el diagrama de áreas para una serie de secciones transversales consecutivas cualesquiera.

La superficie del polígono $1AP_1BCDP_2EP_3F6$ representa el volumen en desmonte entre las progresivas 1 y 6, y las superficies del triángulo $1P_1I$ y del polígono P_26GP_3H los volúmenes en terraplén entre dichos puntos.



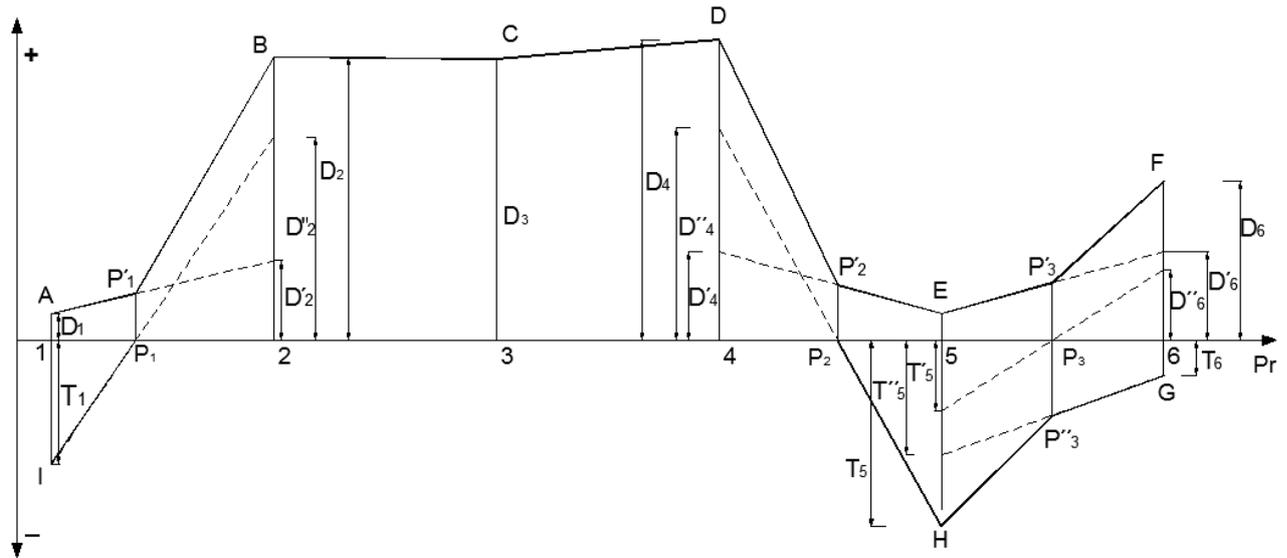


Fig. 21: Diagrama de áreas

5.3.3. Diagrama de áreas modificado

En zonas de llanura, donde prácticamente el proyecto de rasante se realiza totalmente en terraplén, y los pasos de secciones en terraplén a secciones en desmonte son escasos por lo cual su influencia como elemento variable en el cálculo de volúmenes puede despreciarse, el diagrama de áreas se simplifica de acuerdo al siguiente criterio:

El eje de las abscisas mantiene sus características anteriores, pero el de las ordenadas toma el mismo sentido ya sean las secciones en terraplén o en desmonte, diferenciándose las mismas uniendo en línea llena las primeras y en línea de trazos las segundas.

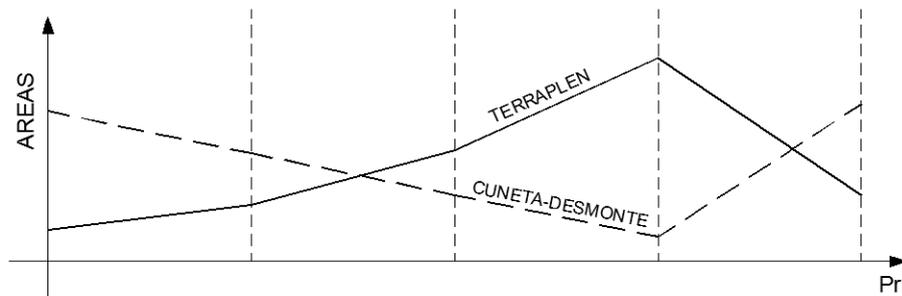


Fig. 22: Diagrama de áreas modificado

De esta manera se puede visualizar de inmediato, en una sección cualquiera, si las necesidades de terraplén son cubiertas con las disponibilidades de suelo provenientes de las cunetas - desmontes.

El área encerrada por la línea llena hasta una determinada progresiva corresponde al volumen de terraplén a construir hasta dicha progresiva, y la encerrada por la línea de trazos a las excavaciones a realizar para la formación de las cunetas.

6. Compensación del movimiento de suelos

Según lo analizado en el apartado 5.3-Cálculo de volúmenes de movimiento de suelos, el diagrama de áreas permite evaluar el volumen de suelo necesario para la formación de los terraplenes y la disponibilidad de material proveniente de las excavaciones proyectadas.

Si las cantidades de suelo utilizado en la construcción de terraplenes pueden ser obtenidas de los productos de los desmontes sin necesidad de realizar transportes pagos de los mismos, es decir si las distancias de transporte no exceden la común de transporte, se expresa que el movimiento de suelos se realiza mediante una compensación transversal de suelos.

Si las necesidades de suelo requeridas en la formación de los terraplenes son cubiertas con los productos de los desmontes pero utilizando para ello el transporte de suelo de los lugares de exceso a los puntos de defecto, se realiza una compensación longitudinal de suelos.

Si para realizar la compensación de suelos se recurre a préstamos adicionales para cubrir necesidades de terraplén, se expresa que el movimiento de suelos se realiza mediante una compensación adicional.

La compensación de suelos considera cantidades de material en terraplén y de material excavado ya afectadas de los valores de cómputo desarrollados en el tema 3. Valores de cómputo para secciones transversales, a fin de que las necesidades reales correspondan a las disponibilidades efectivas de suelo.

Se entiende como ideal de proyecto que la totalidad del movimiento de suelos se ejecute sin realizar transportes innecesarios de suelo.

Para ello debe proyectarse una rasante tentativa y computar el correspondiente movimiento de suelos, modificar posteriormente la misma en aquellos lugares donde puedan mejorarse las condiciones de transporte y las necesidades de suelos.

Los tres tipos de compensación de suelos pueden presentarse en un mismo proyecto, pero generalmente la compensación transversal queda encuadrada para obras en zonas de llanura y onduladas, la compensación longitudinal en zonas de montaña, y la compensación adicional en zonas de bajos con desagüe deficiente y en zonas de alta montaña donde la naturaleza del terreno complica notablemente las tareas de transporte.

En zonas de montaña y alta montaña debe tenerse muy en cuenta, en la compensación de los suelos y en el cómputo del movimiento, el material perdido en laderas con fuertes pendientes transversales.

7. Cálculo de transportes

7.1. Generalidades

Para realizar la compensación integral del movimiento de suelos y computar las necesidades de transporte de los mismos, pueden emplearse 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.

7.2. Diagrama de áreas

Una vez construido el diagrama de áreas para realizar el cómputo del movimiento de suelos según se detalla en el apartado 5.3. Cálculo de volúmenes de movimiento de suelos, se puede proseguir sobre éste el estudio de la compensación y cómputo del transporte.

Entre las progresivas 1 y A hay un volumen faltante de terraplén que debe ser cubierto con el suelo excedente proveniente de los desmontes a partir de A, siempre que el costo del transporte no supere el costo de un préstamo adicional en la sección 1A, justificando el depósito de la excavación sobrante a un costado de la zona de camino. Esto podrá efectuarse siempre que en la sección 1A haya posibilidad de obtener préstamos adicionales.

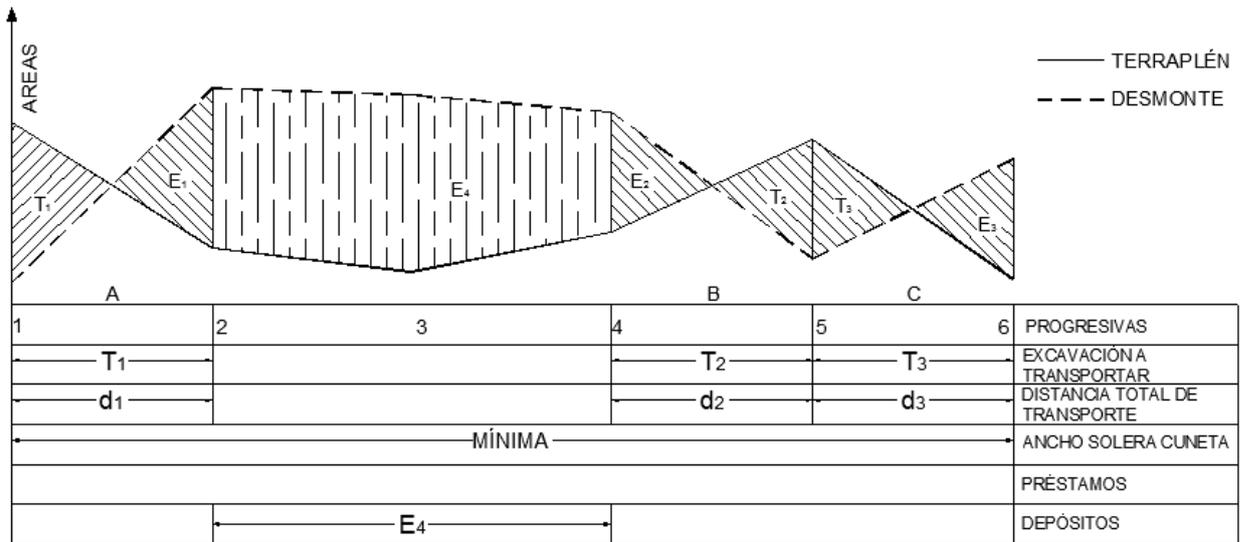


Fig. 23: Diagrama de áreas modificado

Conocido el valor T_1 del volumen faltante de terraplén, se determina a partir de A un volumen igual E_1 de desmonte excedente que compense las necesidades de suelo.

Quiere decir que entre 1 y 2 las necesidades de suelo se compensan con los productos resultantes de los desmontes.

Entre 2 y B hay desmontes disponibles y, a partir de este último punto hasta C comienzan a presentarse necesidades de suelos para terraplén.

El material faltante entre B y C puede ser cubierto con los excesos anteriores a B y los posteriores a C.

Entre C y 6 hay un sobrante de suelos E_3 que es utilizado en la construcción de terraplenes T_3 entre 5 y C.

Queda por cubrir un déficit de suelos para la formación de terraplenes T_2 entre B y 5 para lo cual se utiliza el material sobrante entre 4 y B.

Entre 2 y 4 existe un sobrante de excavaciones E_4 cuyos materiales no se utilizan en la formación de terraplenes, quedando depositados a un costado de la zona de camino.

Para calcular la distancia total de transporte (DTT) de una cámara de trabajo compensada se deben determinar los centros de gravedad de la sección de desmonte excedente y de la sección de necesidad de terraplén que se compensan entre sí. Dichas distancias se representan en el diagrama desde el inicio al fin de la cámara.

El transporte total de suelo, en su unidad correspondiente hectómetros-metros cúbicos [Hm³], estará dado por la sumatoria del transporte de suelos de cada cámara i:

$$\text{Transporte de suelos} = \sum T_i \times DET_i$$

La distancia excedente de transporte para la cámara i será:

$$DET_i = DTT_i - DCT$$

siendo DCT : distancia común de transporte (adoptada para la obra).

7.3. Diagrama de volúmenes de Brückner

7.3.1. Generalidades

El diagrama de volúmenes es una curva construida sobre dos ejes ortogonales, donde las abscisas representan las progresivas del eje del camino y las ordenadas la suma algebraica de los volúmenes desde el origen hasta la sección considerada, adoptando como valores positivos los volúmenes de desmonte y como negativos los de terraplén.

El diagrama de volúmenes, en terrenos de topografía quebrada, es de fundamental importancia en el estudio y proyecto de la rasante pues indica con clara evidencia las alternativas que presenta el movimiento de suelos al variar la rasante en su etapa tentativa. Es además un sistema metódico para el cálculo del transporte en el proyecto definitivo, y permite establecer la sistematización más conveniente del proceso constructivo en lo que respecta al balance técnico económico.

Si con $f_{(x)}$ se indica la ecuación de la curva de las áreas, el diferencial de ordenada dy del diagrama de volúmenes para una sección diferencial dx , será igual al volumen de desmonte o terraplén no compensado en dicha sección dx .

Si la distancia dx se considera entre dos secciones de abscisas x y $(x + dx)$, e y es la ordenada del diagrama de volúmenes en la progresiva x :

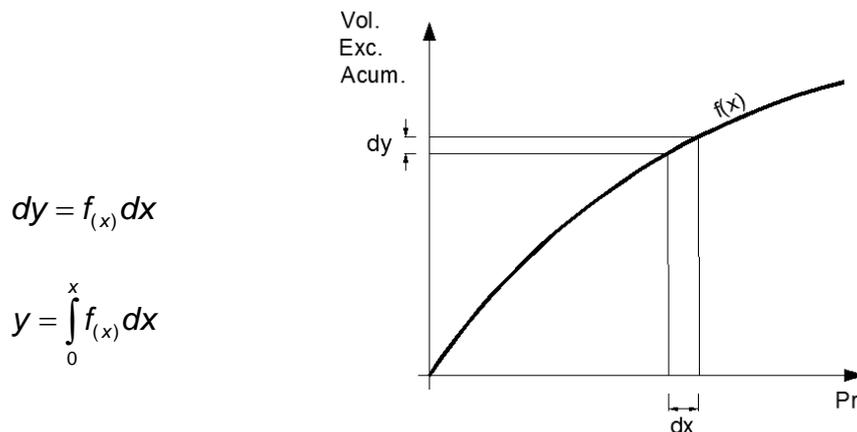


Fig. 24: Diferenciales del diagrama de volúmenes

La ordenada y' en progresiva $(x + dx)$ será:

$$y' = y + dy = y + f_{(x)} dx$$

El diagrama de volúmenes se obtendrá representando, como ordenada de una sección determinada, la suma algebraica de los volúmenes de todo el tramo comprendido entre la sección origen y la considerada.

El elemento dy de volumen se considera positivo si es en desmonte y negativo si corresponde a terraplén.

En el diagrama de la Fig. 25, se observa que entre el punto 1 y el origen 0 hay exceso de desmontes con un volumen V_1 , que de acuerdo a la convención adopta valor positivo. V_2 es el volumen total de suelo disponible desde el origen hasta la sección 2. Entre las secciones 2 y 3 la curva presenta un máximo en el punto A, sección en la cual el desmonte excavado tiene el mismo valor que las necesidades de suelo para el terraplén a construir. Hasta dicho punto y desde el origen hay excesos de desmontes.

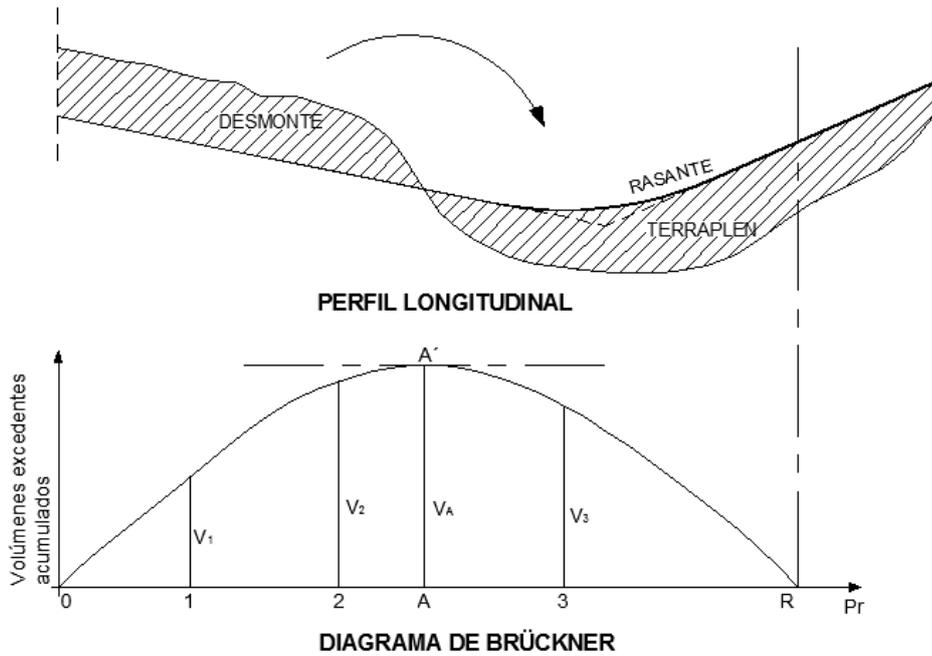


Fig. 25: Perfil longitudinal y Diagrama de Brückner

A partir de dicho punto A la compensación transversal no alcanza a cubrir las necesidades de suelos para la formación de terraplenes, debiendo utilizarse por lo tanto los volúmenes acumulados anteriormente.

Así sigue la curva descendente hasta cortar el eje de las abscisas en el punto R , lo cual significa que se han agotado las disponibilidades de suelo acumuladas desde el origen hasta el punto A .

El área $OA'R$ recibe el nombre de cámara de trabajo compensada por cuanto en el tramo OR se compensa el déficit de suelo con los excesos provenientes de excavaciones.

Si el tramo en estudio estuviera sólo formado por la sección 03 , el V_3 excedente debería depositarse en algún lugar fuera de la obra en ejecución. Estos volúmenes se denominan depósitos.

En la Fig. 26 se muestra un tramo de obra en terraplén entre los puntos 0 y A .

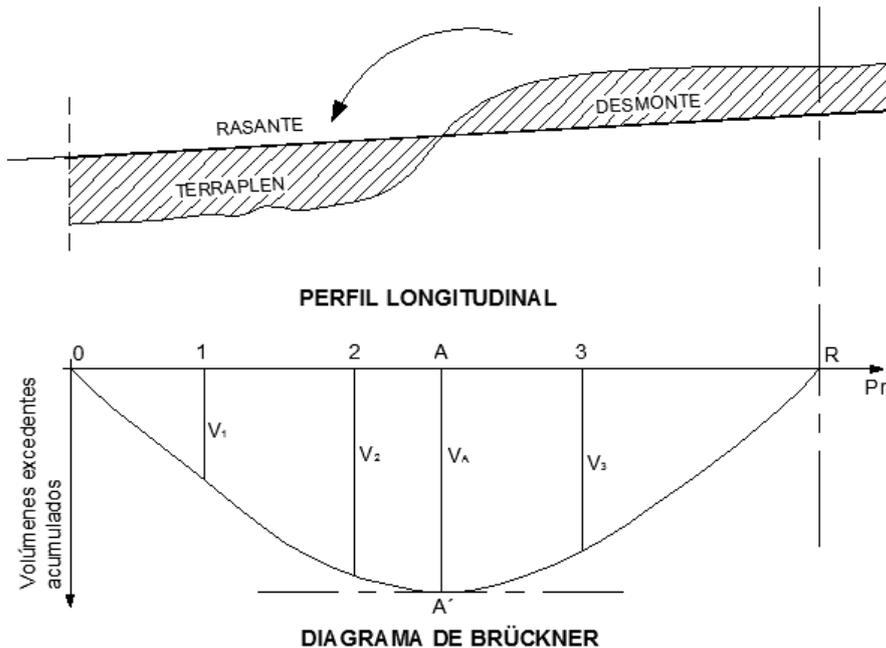


Fig. 26: Perfil longitudinal y Diagrama de Brückner

Analizando el diagrama en forma similar al anterior, se observa que en los tramos 01 y 12 existen necesidades de suelo para cubrir los terraplenes proyectados. En el tramo siguiente y hasta la progresiva A , sección en la cual se compensan las necesidades y disponibilidades de suelo, persisten las mismas condiciones anteriores. Hasta dicho punto y desde el origen se ha acumulado un déficit de suelo igual a V_A . Pero a partir de A se presentan disponibilidades de suelo, cambiando por lo tanto el sentido de la curva.

Si el tramo en estudio terminara en el punto 3, a lo largo del mismo se tendría un volumen de suelo V_3 que debería ser cubierto con material extraído de lugares destinados exclusivamente a tal fin. Estos lugares reciben el nombre de préstamos.

7.3.2. Momento de transporte

Sea una cámara de trabajo compensada $SA'R$.

La superficie delimitada por la curva y el eje horizontal se denomina Momento de transporte. Un momento expresa el producto de una fuerza por una distancia. En este caso se conserva la denominación de momento para el producto del volumen por la distancia, dado que basta multiplicar el volumen de suelo por su peso específico para obtener el peso de suelo transportado.

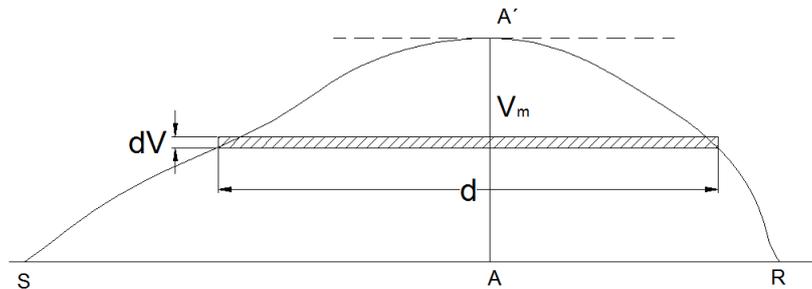


Fig. 27: Cámara de trabajo compensada

$$dM = d \times dV \quad M = \int dM = \int d \times dV$$

7.3.3. Distancia total de transporte

El volumen total a transportar en la cámara de trabajo de la Fig. 27, es el acumulado desde el origen S hasta el punto de máxima A , representado en la curva por la ordenada V_m .

El momento de transporte dividido por el volumen de suelo transportado representa la distancia total de transporte DTT para dicha cámara de trabajo.

$$DTT = \frac{M}{V_m} = \frac{\int d \times dV}{V_m}$$

7.3.4. Horizontales de distribución

Sea un diagrama de volúmenes como el indicado en la Fig. 28:

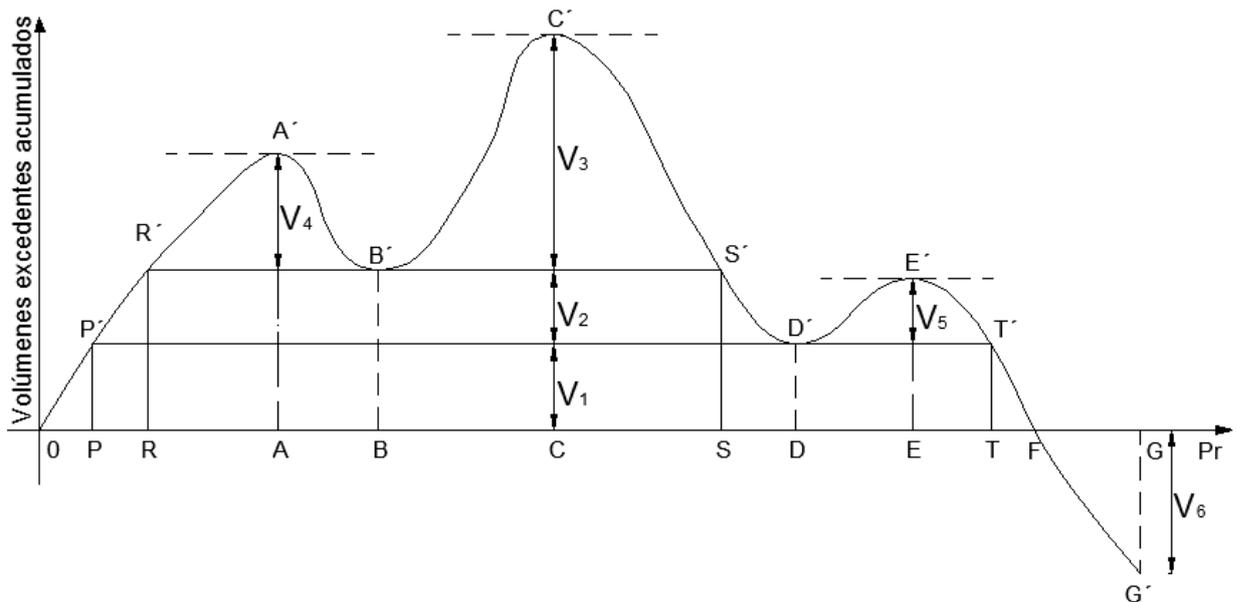


Fig. 28: Horizontales de distribución

En la sección OA se presentan excesos de excavaciones hasta un valor $A'A$ en A . Desde dicho punto y hasta B , en un volumen V_4 , quedan expresadas con sentido negativo las necesidades de terraplén.

En forma similar se presentan con déficit de material las secciones CD y EG , y con excesos de excavaciones las secciones BC y DE . En la sección EG , en el punto F , se han agotado las disponibilidades de excavaciones acumuladas desde el origen 0 .

Si por B' y D' se trazan dos rectas horizontales que resulten tangentes a la curva de volúmenes en dichos puntos, quedan determinados, como intersecciones de dichas rectas con la curva, los puntos P' , R' , S' y T' .

Las cámaras de trabajo compensadas teóricas quedan organizadas como sigue:

El volumen V_1 de suelo excedente en la sección OP debe ser transportado a la sección TF , compensando en dicho lugar las necesidades de terraplén. De manera similar V_2 de PR compensa las necesidades de la sección SD .

En los tramos RB , BS y DT se compensan los excesos con las necesidades tomando como ejes de abscisas las rectas horizontales $R'S'$ y $D'T'$.

Dichas rectas reciben el nombre de Horizontales de Distribución Secundarias.

El diagrama total de volúmenes entre 0 y F corresponde a una Cámara de Trabajo Compensada Principal, y el segmento OF a la Horizontal de Distribución Principal.

El volumen en defecto V_6 de la sección FG debe compensarse con un préstamo lateral si el punto G es fin de tramo, o integrarse a la cámara siguiente si el tramo continúa.

Puede darse el caso que el costo de transporte del volumen V_1 , de la sección OP a la TF supere el costo de un préstamo en TF , entonces el V_1 de OP se deposita fuera de la zona de obra sin transportarlo y se realiza un préstamo compensador en TF .

La distancia total de transporte para la cámara de trabajo principal es:

$$DTT = \frac{\text{Momento.de.transporte.cámara.principal}}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}$$

7.3.5. Horizontal de distribución de costo mínimo

El número de horizontales de distribución que permiten cerrar cámaras de trabajo compensadas es ilimitado; interesa hallar la que provoque el mínimo costo de transporte.

El costo de transporte es proporcional al momento de transporte, y las distancias de transporte más económicas para un determinado tramo serán las resultantes de los mínimos momentos de transporte.

Entonces, la horizontal de distribución de costo mínimo será aquella que haga mínimas las superficies de las cámaras de trabajo compensadas.

Sea una curva de volúmenes y una determinada horizontal de distribución OS.

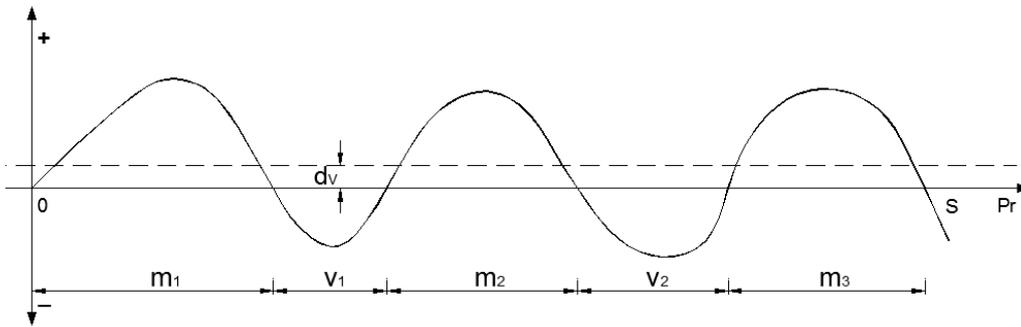


Fig. 29: Horizontal de costo mínimo

Si se desplaza verticalmente dicha horizontal de distribución un valor infinitesimal d_v , los momentos de transporte sufrirán una variación que en correspondencia con los segmentos m_1, m_2, \dots correspondientes a los montes, será negativa y para los v_1, v_2, \dots correspondientes a los valles, será positiva. La variación total del costo de transporte será:

$$dc = (c_1 \times v_1 + c_2 \times v_2 + \dots - c'_1 \times m_1 - c'_2 \times m_2 - \dots) \times d_v$$

siendo c y c' los costos unitarios de transporte para las correspondientes distancias de transporte.

$$\frac{dc}{d_v} = \sum c_i \times v_i - \sum c'_i \times m_i$$

El costo será mínimo cuando la derivada sea cero, $\frac{dc}{d_v} = 0$

Entonces:

$$\sum c_i \times v_i = \sum c'_i \times m_i$$

Si las distancias de transporte están todas comprendidas dentro de un cierto rango, los costos unitarios de transporte serán iguales, resultando:

$$\sum v_i = \sum m_i$$

expresión que significa que la horizontal de mínimo costo será aquella que cumpla con la condición: la suma de los segmentos v es igual a la suma de los segmentos m .

7.3.6. Compensación de cámaras de trabajo

Al compensar las cámaras de trabajo se debe tener presente no sólo el mínimo costo de transporte sino el mínimo costo de la operación total del movimiento de suelos.

Si los costos de transporte superan los ocasionados por depositar los desmontes excedentes y realizar una extracción lateral adicional en el lugar de déficit de suelos, la condición de mínimo costo de transporte no es la que cumple con el menor costo de movimiento de suelos.

Por lo tanto, la amplitud de la cámara de trabajo compensada estará limitada por la relación costo de transporte versus costo de excavación.

La distancia máxima de transporte económica será aquella que cumpla con la siguiente condición:

$$c[\$/hmm^3] \times d_{m\acute{a}x} [hm] = e[\$/m^3] + i[\$/m^3] + t[\$/m^3]$$

siendo:	<i>c</i>	costo unitario de transporte
	<i>e</i>	costo unitario de excavación
	<i>i</i>	incidencia del costo de la limpieza del terreno y del destape y tapado de préstamos por unidad de excavación realizada
	<i>t</i>	incidencia del costo de la expropiación por unidad de excavación

En la operación de compensación de cámaras de trabajo debe tenerse presente que obstáculos naturales como ríos y arroyos no vadeables con equipos, zonas con suelos no aptos para la formación de terraplenes, transportes sobre fuertes pendientes ascendentes, etc., obligan a cerrar las cámaras en puntos determinados.

Por último, para poder considerar una cámara de trabajo compensada principal, las cámaras secundarias de trabajo que la integran deben tener sus distancias de transporte dentro del mismo rango de costos unitarios de transporte.

Resumiendo, para realizar una adecuada compensación de suelos en un diagrama de Brückner, pueden enunciarse las siguientes premisas:

- 1- Puntos obligados de cierre
- 2- Horizontales de distribución de mínimo costo
- 3- Amplitud de cámaras compensadas limitadas a distancias de transporte económicas
- 4- Cámaras principales con distancias de transporte de las secundarias que la integran dentro del mismo rango de costos unitarios.

Sea la Fig. 30:

En primera instancia se debería tratar de modificar la rasante reduciendo los desmontes entre *A* y *B* y entre *F* y *G*, y los terraplenes entre *K* y *L*. Si esto no fuese posible entonces corresponde iniciar las tareas de compensación.

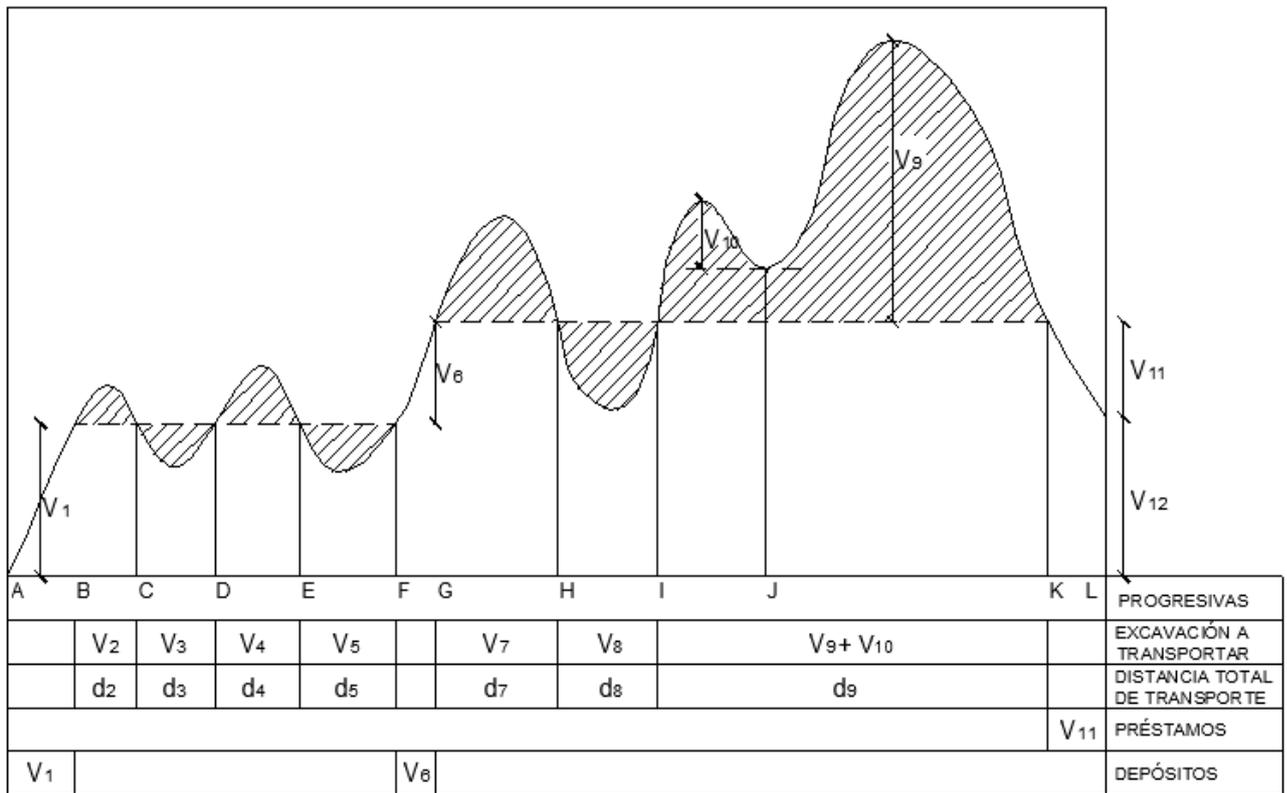


Fig. 30: Diagrama de Brückner – Compensación de suelos

Una solución posible sería realizar el depósito de suelo sobrante V_1 entre A y B , y con una horizontal de distribución de mínimo costo cubrir cuatro cámaras entre B y F . De continuar dicha horizontal entre F y L se originaría una cámara con distancias de transporte posiblemente no económicas, lo cual determinaría la conveniencia de realizar un depósito V_6 entre F y G .

Entre G y K se define una horizontal de distribución que origina tres cámaras compensadas, dos de ellas de mínimo costo y una tercera integrada por tres cámaras secundarias.

Entre K y L hay déficit de suelo para terraplenes, realizándose un préstamo de volumen V_{11} para cubrir tales necesidades.

Como medio operativo pueden realizarse diversos cierres alternativos y mediante la comparación de sus costos determinar cuál es la compensación más económica.

El diagrama de Brückner obtenido en un proyecto resulta de considerar condiciones ideales de trabajo que ocasionan un costo mínimo de transporte.

El contratista que construirá las obras puede no emplear tal diagrama y realizar otra compensación que, si bien puede resultar de mayor costo, le resulte más favorable de acuerdo al tipo de equipo que disponga, a la programación de la marcha de los trabajos, y a los precios unitarios de contrato.

Es así que podría disminuir los transportes a costa de un incremento de los depósitos y los préstamos si, en ciertas condiciones de trabajo, no es eficiente el rendimiento de sus equipos para transporte de suelos.

Ahora bien, independientemente de la forma de trabajo del contratista, solamente se reconoce a los efectos de la medición y pago de un transporte, y siempre que el ítem esté contemplado en el presupuesto, aquel transporte resultante de una compensación que logre un mínimo costo con adecuados métodos y equipos de trabajo.

Bibliografía

- **PLIEGO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES**
Dirección Nacional de Vialidad - Edición 1998.
- **TERRAPLENES Y DESMONTES**
Ing. Guillermo Antonio Cornero - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - U.N.R. - 1986.
- **TRAZADO Y DISEÑO GEOMÉTRICO DE CAMINOS RURALES**
Ing. Francisco J. Sierra - Escuela de Graduados Ingeniería de Caminos - U.B.A. - 1986.

ÍNDICE

MOVIMIENTO DE SUELOS	1
1. Introducción	1
1.1. Conceptos generales	1
1.2. Desbosque, destronque y limpieza del terreno.....	1
1.3. Excavaciones	2
1.4. Terraplenes.....	2
1.5. Recubrimiento con suelo seleccionado	3
1.6. Compactación especial	3
1.7. Abovedamientos	3
1.8. Preparación de la subrasante	3
1.9. Construcción de banquetas.....	3
1.10. Despedrado de laderas	4
1.11. Recubrimiento de taludes y banquetas	4
1.12. Conservación.....	4
1.13. Transporte de suelos	4
2. La sección transversal	5
3. Valores de cómputo para secciones transversales	5
3.1. Coeficientes de transformación.....	5
3.2. Secciones con desmonte en roca y suelo común.....	6
3.2.1. Examen directo	7
3.2.2. Métodos geofísicos	8
3.3. Caja de pavimento	8
3.4. Banquetas	8
3.5. Gálibo de la obra básica en curva.....	9
3.6. Coronamiento con barandas de defensa.....	9
3.7. Limpieza del terreno.....	9
3.8. Compactación de la base de asiento del terraplén.....	9
3.9. Escalonamiento de la base de asiento del terraplén	9
3.10. Materiales inadecuados en la base de asiento del terraplén.....	10
3.11. Desmonte en roca	10
4. Cómputo de secciones transversales	10
4.1. Métodos de cómputo.....	10
4.2. Método analítico.....	11
4.2.1. Generalidades.....	11
4.2.2. Fórmulas de secciones simplificadas	11
4.2.2.1. Secciones en terraplén	11
4.2.2.2. Secciones en desmonte	13
4.2.2.3. Secciones de cuneta mínima.....	14
4.2.2.1. Secciones de cuneta máxima	14
5. Cálculo de volúmenes.....	15
5.1. Volumen del prismoide.....	15
5.1.1. Fórmula exacta	15
5.1.2. Volumen por la media de las áreas	17
5.1.3. Errores producidos.....	17
5.2. Volumen en alineamientos curvos.....	19
5.3. Cálculo de volúmenes de movimiento de suelos.....	20
5.3.1. Diagrama de áreas.....	20
5.3.2. Construcción del diagrama de áreas.....	20
5.3.2.1. Casos particulares.....	20
5.3.2.2. Caso general	23
5.3.3. Diagrama de áreas modificado	24
6. Compensación del movimiento de suelos.....	24
7. Cálculo de transportes.....	25
7.1. Generalidades.....	25
7.2. Diagrama de áreas.....	25

7.3.	Diagrama de volúmenes de Brückner	27
7.3.1.	Generalidades.....	27
7.3.2.	Momento de transporte	29
7.3.3.	Distancia total de transporte.....	29
7.3.4.	Horizontales de distribución	29
7.3.5.	Horizontal de distribución de costo mínimo	31
7.3.6.	Compensación de cámaras de trabajo.....	31
8.	Bibliografía.....	34