Optimización del Empleo de Maquinarias para el Movimiento de Tierras de un Proyecto Vial mediante el uso de Diagrama de Masas

Gabriela Elizabeth Andrade Lam (1), Pedro Armando Ramírez Alvarado (2), Ing. Eduardo Santos Baquerizo (3)
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (1) (2) (3)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (1) (2) (3)
Km. 30,5 Vía Perimetral, 09-01-5863, Guayaquil-Ecuador (1) (2) (3)
gaby16lam@hotmail.com (1), pedroski_ramirez@hotmail.com (2), esantos@espol.edu.ec(3)

Resumen

En la presente tesina de seminario de graduación, se analiza desde un marco teórico-práctico el proceso constructivo necesario para la conformación de plataformas a nivel de sub-rasante, mediante el cual se busca acoplar el diseño y cálculos efectuados en oficina al trabajo de campo y así optimizar costos y tiempo en los trabajos de movimiento de tierras, que por lo general es el rubro más imponente en cuanto a construcciones viales. Para ello, se ha seleccionado una vía típica de la región costa del Ecuador para aplicar en él la temática de esta tesina. Uno de los puntos principales es el "Diagrama de Masas", importante herramienta que permite una muy buena aproximación de los volúmenes de tierra a ser removidos. Básicamente, de este diseño de movimiento de tierras depende la correcta determinación del equipo pesado adecuado para el trabajo a realizar, tal como excavaciones, cortes, rellenos y compactación, optimizando así el tiempo de ejecución e inversión monetaria.

Palabras Claves: *Movimiento de tierras, Maquinaria para la construcción de vías, Diagrama de masas, Compensación de volúmenes, Conformación de terraplenes.*

Abstract

In this seminar graduation thesis, the necessary construction process for the formation of road platforms at the sub-grade level is analyzed from a theoretical-practical framework, which seeks to match the design and calculations made in the office to the field work, in order to optimize costs and time in works of ground moving, which is usually the most expensive item in terms of road construction. For this, a typical road of Ecuador in the coastal region has been selected to apply the theme of this thesis. One of the main subjects is the "Mass Diagram", an important tool that gives a good approximation to the real volumes of ground to be removed. Basically, from this design of ground moving depends the determination of the appropriate equipment for the work, such as digging, cutting, filling and compacting, thus optimizing the execution time and monetary investment.

Key words: *Ground moving, Equipment for Roads Construction, Mass Diagram, Volumes Compensation, Formation of Road Platforms.*

1. Introducción.

En un proyecto de vía terrestre de comunicación, sea ésta una carretera urbana o rural, se establece un diseño que se adecue a las necesidades del área usuaria de la vía, en base a una serie de datos recopilados en campo. Una vez definido el proyecto bajo todos los parámetros necesarios, y previo a la construcción, se procede a la determinación de volúmenes de material que serán removidos o reubicados con el fin de ajustar el nivel de sub-rasante del terreno al diseño establecido. Este paso se conoce como "Movimiento de Tierras", y es de vital importancia, pues de su correcta planificación depende la pérdida o ganancia de tiempo y dinero.

El movimiento de tierras comprende el grupo de actividades que producen las modificaciones necesarias para llegar al nivel de diseño de la sub-rasante, mediante el empleo de maquinaria pesada tal como: retroexcavadoras, cargadoras, volquetas, entre otras, cuyas funciones y rendimientos serán analizados en el presente trabajo.

Previo al movimiento de tierras, es necesario ejecutar una serie de trabajos en campo para poder indicar claramente a los Ingenieros constructores y los operadores de maquinarias los sitios por donde atraviesa la vía, y los niveles a los cuales deben regirse para construir el terraplén o relleno. Todos estos pasos previos serán detallados a continuación.

1.1. Objetivos:

- Detallar los procedimientos para determinar volúmenes de tierras y los equipos necesarios para ejecutar los trabajos, cuya clave es el correcto manejo del diagrama de masas, el cual será ampliamente estudiado.
- Analizar el rendimiento de los equipos que comúnmente intervienen en la construcción de una carretera, tanto individualmente como en grupo.
- Definir el costo total de un movimiento de tierras, que incluya costes de corte, relleno y acarreos.

1.2. Campo de Acción:

Esta tesina abarca el proceso constructivo de la plataforma de corte o relleno sobre el cual se asentará el pavimento, para ello se analizará las actividades previas al ingreso de maquinaria en campo y el diagrama de masas que me permite establecer volúmenes de corte y relleno, con los cuales se determina los equipos que cumplirán los trabajo a cabalidad.

1.3. Resolución del problema.

El problema en movimiento de tierras radica en la falta de planificación previa ejecución, de qué equipos utilizar para los trabajos de excavación, relleno y transporte, y el poco conocimiento de las condiciones en que se encuentra el terreno. Los ingenieros constructores suelen cometer el error de alquilar la maquinaria sin determinar previamente las necesidades de la misma. Por ello, es común ver en una obra que los equipos se encuentren paralizados, sin poder avanzar, lo cual representa pérdida para el contratista. Por ello, el presente trabajo busca establecer claramente el procedimiento idóneo para reducir al máximo los tiempos improductivos y pérdidas de dinero.

2. Actividades previas al Movimiento de Tierras.

Esta sección se enfoca en todos los pasos que se deben ejecutar en campo previo al movimiento de tierras, de manera que el operador de la maquinaria tenga toda la información necesaria en campo para que pueda ingresar y cumplir con sus funciones a cabalidad.

Con toda la información del proyecto horizontal y vertical, es posible realizar las siguientes actividades:

- Replanteo de los puntos inicial y final de referencia.
- Replanteo del eje de la vía.
- Correcciones angulares y lineales.
- Replanteo de curvas horizontales.
- Abcisado del eje de la vía.
- Replanteo y trazado de la franja o ancho de la vía.
- Desbroce y limpieza del terreno.
- Replanteo de cotas de diseño.

3. Compensación de Volúmenes: Diagrama de Masas.

Para conocer el coste de las explanaciones, no basta con conocer el volumen del desmonte que se tiene que excavar, y el del relleno que se tiene que construir: para asignar unos precios unitarios razonables hay que saber también como se va a realizar este proceso, y optimizarlo. Para ello se dispone de técnicas de investigación operativa, tales como el diagrama de masas.

El diagrama de masas es el método empleado para definir el estudio de *compensación longitudinal*. Básicamente, es una herramienta gráfica que define las canteras de compensación que existen a lo largo de la vía, y se aplica mediante la representación de abscisas en el eje horizontal y ordenadas en el eje vertical. Éstas ordenadas indican la suma acumulada de volúmenes de corte y relleno que intervienen en la compensación longitudinal, el cual está expresado en metros cúbicos (m3). Este diagrama presenta características básicas que dependen de la geometría de la curva.

3.1. Datos necesarios para elaborar el diagrama de masas.

Para poder efectuar la cuantificación del volumen del movimiento de tierras de un proyecto vial, es imprescindible contar con la siguiente información:

- Perfil longitudinal de la vía.
- Sección típica del pavimento.
- Secciones transversales.
- Cálculo de áreas de corte y/o relleno.
- Cálculo de volúmenes de corte y/o relleno.

3.2. Variaciones volumétricas de material.

En las diversas operaciones constructivas los materiales experimentan cambios de volumen que deben ser considerados para la programación y el presupuesto de la obra, y primordialmente para la contratación del equipo y el material a transportar. Debido a esto, es imprescindible conocer las características de los suelos para establecer sus propiedades, es decir, su naturaleza y comportamiento bajo la acción de ciertos elementos. La propiedad física básica involucrada en un movimiento de tierras es la densidad, la cual está determinada por el peso por unidad de volumen, y variará de acuerdo con el mayor o menor acercamiento entre las partículas del suelo, o sea, su mayor o menor compactación.

En general, es posible determinar el coeficiente de variación volumétrica de un material en función de su densidad natural (δ_n) y su densidad óptima (δ_p), una fórmula aproximada es:

$$\boxed{C_{VV} = \frac{\delta_n}{0.95\delta_p}}$$

Existen básicamente dos fenómenos relacionados con la variación volumétrica de un suelo: el esponjamiento y la contracción.

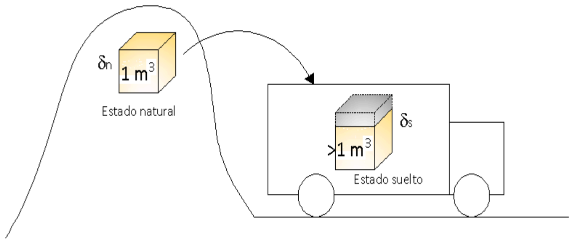

Figura 1. Esponjamiento de material en estado natural.

Figura 2. Contracción del material suelto.

3.3. Cálculo de Ordenadas.

Las ordenadas del diagrama de masas indican volumen de tierra, los cuales resultan a partir del cálculo del volumen de corte o relleno de cada abscisa del eje de la vía, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Volúmenes de corte son positivos (+).
- Volúmenes de relleno son negativos (-).
- Los volúmenes de relleno determinados a partir de las áreas de perfiles transversales son volúmenes comprimidos, por ello es necesario considerar el coeficiente de contracción con el cual se establezca el volumen suelto para hacer un terraplén compactado. Este volumen se refleja en la tabla como el Volumen Corregido, que resulta de multiplicar el volumen obtenido por el coeficiente de contracción, que varía dependiendo del tipo de suelo.
- Si la última ordenada del diagrama de masas es positiva, hay material sobrante (exceso de corte), si es negativa, falta material para relleno.

3.4. Distancia de Acarreo.

Es la distancia a la que es transportado el material en un movimiento de tierras, y sus unidades serán de volumen en longitud (m^3-km).

De acuerdo a la magnitud de la distancia, se clasifica en dos tipos:

- Acarreo Libre. Es aquel que se incluye dentro del costo de corte de material, en este trabajo se consideró una distancia de 300 metros.
- Sobreacarreo. Es la distancia adicional, después del acarreo libre, que debe ser pagado fuera del costo de corte de material.

3.5. Canteras de compensación y no compensadas.

Se denomina cantera al lugar donde se extrae material para ser utilizado como relleno, siempre y cuando cumpla con las características necesarias para el fin deseado. En un movimiento de tierras existen dos tipos de cantera: de compensación y no compensadas.

Las canteras de compensación son aquellas en las que la línea compensadora del diagrama de masas tiene una longitud máxima de 300 m, la cual limita los acarreos de volúmenes que pasan de corte a relleno o viceversa. El acarreo en estos casos será considerado únicamente como *acarreo libre,* y la maquinaria a emplearse dependerá del volumen a transportar.

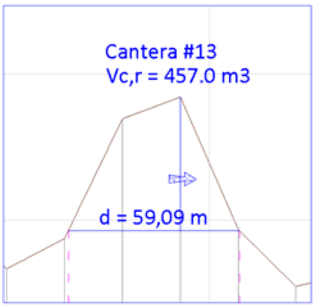

Figura 3. Cantera de compensación.

Las canteras no compensadas son aquellas que solo presentan volúmenes solo de corte o solo de relleno, el cual no ha podido utilizarse en un tramo consecutivo de la vía. El material sobrante de corte deberá, de ser posible, ser transportado a una cantera de relleno no compensada. Es aquí donde intervienen las distancias de acarreo libre y/o sobreacarreo.

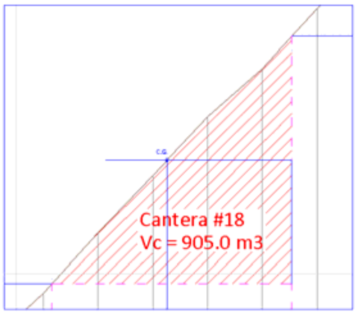

Figura 4. Cantera de corte.

4. Equipo caminero utilizado para Construcción de Vías.

El ingeniero civil responsable de la construcción de una carretera debe planificar con anticipación el grupo de equipos que debe tener en obra para realizar las diferentes actividades y rubros que intervienen en la ejecución de la construcción de la vía. Este equipo debe ser adquirido o alquilado, y debe estar en condiciones óptimas para los diferentes rubros y etapas. Para realizar esta planificación, el ingeniero debe contar con la lista de rubros que intervienen en cada una de las actividades y conocer para qué sirve cada una de las maquinarias.

En esta tesina, se describe cada uno de los equipos comúnmente utilizados para las diferentes actividades de movimiento de tierras, entre los cuales tenemos:

- Cargadoras.
- Excavadoras.
- Motoniveladora.
- Traíllas y mototraíllas.
- Rodillo liso.
- Rodillo pata de cabra.
- Tractor de oruga.
- Retroexcavadora.
- Volqueta.

Figura 5. Motoniveladora.

Figura 6. Tractor de Oruga.

4.1. Operaciones básicas para un movimiento de tierras.

Respecto a la elección y utilización de maquinaria para el movimiento de tierra, es posible agrupar las siguientes operaciones:

- Remoción de tierras desechables.
- Banqueos.
- Excavaciones en zonas de préstamos.
- Ejecución de terraplenes.
- Transportes.

4.2. Procesos constructivos de los rubros de movimiento de tierras.

Para la conformación de un terraplén empleando material del sitio, se siguen básicamente los siguientes pasos:

- Explotación:

Se procede a realizar la explotación o corte de material de las canteras determinadas en el diagrama de masas. Para ello, se debe hacer uso de un tractor, cuyo tamaño depende del volumen a cortar.

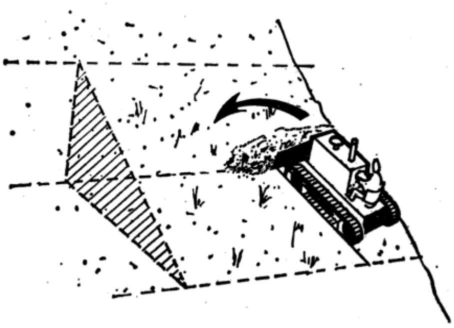

Figura 7. Esquema de corte realizado por un tractor

- Transporte:

Luego de la explotación, con una cargadora o excavadora, se carga el material a una volqueta para ser transportado.

Figura 8. Carga de material en volqueta.

- Relleno

El material transportado será stockeado en los sitios adyacentes al relleno, este material deberá ser tendido para proceder a la conformación del terraplén.

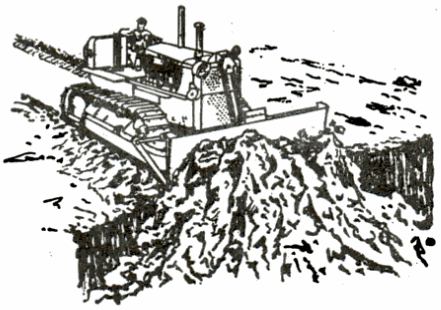

Figura 9. Colocación de material en área de relleno

Luego, se compacta el material haciendo uso de un rodillo. Dependiendo de las características del suelo, se empleará un rodillo liso o pata de cabra, y se determinará la frecuencia y/o vibración del tambor.

4.3. Grupos de maquinarias a utilizarse de acuerdo a la distancia de acarreo.

Para los trabajos a ejecutarse en el presente proyecto, se agrupará la maquinaria de acuerdo a la distancia de acarreo entre canteras. Se ha distinguido tres grupos diferentes, los cuales se indican brevemente a continuación.

- Grupo 1.

Se utilizará para los casos en que haya canteras de compensación, en las cuales el volumen de corte y relleno es grande, o cuando la distancia es grande (canteras no compensadas que necesitan material de préstamo).

- Grupo 2.

Se empleará en los casos en que la distancia de acarreo sea menor a los 300 metros, y que el volumen de corte y relleno sean pequeños.

➢ Grupo 3.

Se utilizará cuando las distancias y volúmenes de corte y relleno en canteras de compensación sean pequeños.

4.4. Rendimiento de equipos.

➢ Rendimiento individual.

La Producción o Rendimiento de una máquina es el número de unidades de trabajo que realiza en la unidad de tiempo, generalmente una hora:

$$Rendimiento = Unidades\ de\ trabajo / hora$$

Para determinar el rendimiento es necesario además considerar dos factores importantes: *tiempo de ciclo* y *factor de eficiencia*. El rendimiento de un equipo puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\boxed{R = \frac{Capacidad}{Ciclo} \times \frac{\#Ciclos}{hora} \times eficiencia}$$

➢ Tiempo de ciclo.

Es el tiempo necesario que invierte una máquina en hacer el trabajo completo en un viaje de ida y vuelta.

En este tiempo de demora están incluidas todas las operaciones necesarias para realizar el trabajo correspondiente, por una vez, por ejemplo, en el caso de la mototraílla: excavación, carga, acarreo, descarga y retorno al lugar original. Entonces, el ciclo es el tiempo invertido por la máquina en realizar todas estas operaciones completas cada vez.

El "tiempo de ciclo" se compone de dos partes: tiempo fijo y tiempo variable.

Tiempo fijo: es el que invierte una máquina en todas las operaciones del ciclo, que no sean acarreo y retorno. Estos tiempos de carga, descarga y maniobras son casi iguales para un mismo material en cualquier operación, aún cuando la distancia de acarreo varíe.

Tiempo variable: es el que se necesita para el acarreo (viaje de ida y regreso) y es variable dependiente de la distancia hasta la zona de desaojo y la velocidad de la máquina.

➢ Factor de eficiencia.

Este factor de eficiencia se refiere al tiempo de trabajo, ya que en ninguna circunstancia se puede conseguir una eficiencia de trabajo de 60'/h, y en consecuencia se acostumbra tomar ciertos tiempos de trabajo producto de la experiencia, los cuales han sido tomados de acuerdo al tipo de maquinaria.

➢ Rendimiento por grupo de maquinarias.

En esta sección se define el rendimiento cuando un grupo de maquinarias trabajan en conjunto para ejecutar un rubro en particular, sea éste corte o relleno.

Aquí es necesario redefinir el concepto de *tiempo de ciclo*: es el tiempo necesario que invierte *el grupo de máquinas* en hacer el trabajo completo en un viaje de ida y vuelta.

Para cada caso en particular existe un rendimiento distinto, ya que la combinación de equipos difiere para cada obra. Por ejemplo, para una obra se puede alquilar una excavadora de 1 m3 de capacidad y un volquete de 10 m3, mientras que para otra obra exista una excavadora de 1.50 m3 con el mismo volquete, en ambos casos el tipo de maquinaria es el mismo, pero las capacidades son distintas, por ello los rendimientos varían.

5. Presupuesto

En todo proyecto es importante realizar un diseño que además de funcional sea económico. Es por esto que el presupuesto es una parte fundamental, pues es aquí donde se estiman los precios o costes que va a tener la obra. En construcciones viales, es de extrema importancia, ya que el costo de la maquinaria es elevado, por lo general, el rubro más abultado de la construcción es el movimiento de tierras, aún si solamente se considera material de préstamo del sitio sin importación de material.

En un movimiento de tierras se tienen tres rubros base:

➢ Corte de material.

➢ Relleno.

➢ Transporte.

Para cada uno de estos rubros se determinó el costo unitario con base en los rendimientos y cuadrillas de equipos analizados en apartados anteriores, y a partir del cálculo de volúmenes del diagrama de masas se *estimó* las cantidades de cada rubro. Con esta información, fue posible determinar un presupuesto referencial para el proyecto. Es importante recalcar el carácter de *referencial* de este presupuesto, por cuanto los volúmenes de obra y rendimientos de equipos son estimados, y varían por diversos factores para cada obra en particular.

6. Conclusiones

- A partir del diagrama de masas se realizó un análisis del equipo necesario para optimizar su uso en la construcción de un proyecto vial de carretera, ya que al no planificar correctamente, el ingeniero constructor podría alquilar mayoritariamente equipos adecuados para relleno, cuando lo predominante en la vía son los cortes de material. Esto conlleva a una paralización de la maquinaria, y dado su elevado costo horario, se refleja en una pérdida monetaria para el contratista, además del retraso en la entrega de los trabajos.

- El diagrama de masas nos permite evaluar en forma certera los volúmenes a mover, y en base a él, también es posible determinar la maquinaria más adecuada para los trabajos, de acuerdo a los grupos de maquinarias establecidos, y en función de su rendimiento estándar, determinamos un costo unitario.

- El factor de esponjamiento es determinante al momento de calcular movimientos de tierras, en la fase previa a la ejecución, pues si no se considera al elaborar el presupuesto, se estará omitiendo la necesidad de mayor cantidad de equipos, tal como la volqueta, y al momento de la construcción, se reflejará la pérdida de dinero por el hecho de no haber ofertado incluyendo la variación volumétrica del material. Cabe recalcar que el esponjamiento se compensa su costo en el Análisis de Precios Unitarios y rendimiento de equipos, nunca debe considerarse como un volumen de obra adicional.

[]

7. Recomendaciones.

- Se recomienda para cualquier proyecto vial PREVIA EJECUCION DE LOS TRABAJOS definir todos los parámetros mencionados a lo largo de la presente tesina: proyecto horizontal, vertical, cálculo de áreas y volúmenes, y lo más importante para el movimiento de tierras: el diagrama de masas.

- Para determinar el factor de esponjamiento, realizar una prueba de laboratorio para tener un valor real de este fenómeno que ocurre en el suelo. Con este factor se puede calcular el diagrama de masas. Aún así, se recomienda efectuar una prueba de reducción en campo, haciendo un muestreo, pues si el coeficiente de reducción excede del 30%, el material deberá ser desalojado y no podrá ser utilizado como relleno.

- El ingeniero encargado del diseño de movimiento de tierras y su posterior construcción deberá tener una vasta experiencia en la rama, porque de no ser así podría cometer los errores mencionados a lo largo de la tesina, y provocar una pérdida económica considerable.

8. Bibliografía.

Apuntes de clases del Seminario de Graduación "Vías de Comunicación" dictado por el Ing. Eduardo Santos Baquerizo.

- Texto: Métodos, Planeamiento y Equipos de Construcción. Autor: R. L. Peurifoy; 1971.

- Manual de Costos en la Construcción. Cámara de la Construcción de Quito; Mayo 2001.

- Texto: Ingeniería de Carreteras, Volumen I. Autor: Carlos Kraemer; Editorial: Mc Graw Hill.

- Monografía: Construcciones Industriales. Autores: Juan Cherné – Andrés González.

- Texto: Ingeniería Vial I: Para estudiantes de grado de Ingeniería Civil. Autor: Hugo Andrés Morales Sosa.

- Texto: Máquinas para Movimiento de Tierras – 2da edición. Autor: Jean Costes.

- Texto: Planes de Obra – 4ta edición. Autor: Fco. Javier Zaragoza Martínez

- Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes. MOP-001-F-2002. Autor: Ministerio de Obras Públicas del Ecuador.

- Página Web de Caterpillar: www.cat.com

- Página Web de Komatsu: www.komatsu.com