



República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Departamento de Metalurgia Electromecánica

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

*Título: Incidencia de las propiedades
mecánicas del rechazo minero en el consumo de
combustible*

Autor: Niulvis Reynosa Terrero

Tutores: Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié

Moa /2012

“Año 54 de la Revolución”



Declaración de Autoridad

Yo: Niulvis Reynosa Terrero

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Niulvis Reynosa Terrero

Dr.C. Tomás H. Fernández Columbié



Agradecimientos

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mi tutor por confiar en mí en la realización de este trabajo el Dr. C. Tomás Fernández Columbié.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mí.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la revolucion, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .

A todos

Muchas Gracias.



Dedicatoria:

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

A mis madres Pedra, Mariluz y Niurka.

A mis hermanos Miglleiris, Yuneisis y Noelvis.

A mí querida y estimada esposa.

Yordenquis Rodríguez Breffe.

A mi hijo: Ranni Reynosa Rodríguez

A mis suegros Israel y Ana María

A mis amigos:

Odelmis, Doralis, Ariel, en especial a Oclides, a todos mis tíos y mis primos a mi cuñado y a todos aquellos que estuvieron a mi lado durante los 6 años de mi carrera.

A nuestra revolución, por las posibilidades que me ofrece.



TABLA DE CONTENIDO	PÁG
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	5
1.2. Definición de presas de relaves	5
1.2.1. Generalidades sobre presas de residuos	6
1.3. Propiedades mecánicas de los suelos	7
1.3.1. Estructura de los suelos	8
1.3.2. Suelos compactados	10
1.3.3. Composición mineralógica de las fracciones del suelo	11
1.4. Propiedades geotécnicas de los lodos	12
1.5. Influencia del agua capilar	14
1.5.1. Control del agua en presas de residuos	16
1.6. Explotación de la balsa	17
1.7. Consecuencias de la rotura de presas de relaves	17
1.8. Características de los residuos mineros y formas de manejo	18
1.9. Empleo de transporte en la fabricación de presas de relaves mineros	20
1.9.1. Equipos automotores de combustión interna	21
1.9.2. Vibrocompactadora	22
1.10. Ventajas de los motores de combustión interna	22
1.11. Caracterización de los motores Hyundai	23
1.11.1. Generalidades de los motores Hyundai	23
1.11. Conclusiones del capítulo 1	26
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	27
2.2. Procedimiento para determinar las propiedades mecánicas del rechazo	27
2.3. Materiales empleados en la experimentación	27
2.4. Características constructivas de la presa de cola	30
2.5. Metodología de cálculo para determinar las propiedades mecánicas	33
2.6. Clasificación y propiedades de las partículas del suelo	35
2.7. Caracterización del transporte en la Presa de colas	42
2.7.1. Determinación del índice de consumo de combustible	43



2.6. Conclusiones del capítulo 2	44
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
3.1. Introducción	45
3.2. Análisis de la composición del suelo	45
3.3. Análisis del cálculo para determinar las propiedades mecánicas	46
3.3.1. Análisis del proctor estándar	52
3.4. Análisis del consumo de combustible para tiempo de seca	53
3.4.1. Consumo de los meses con afectaciones de lluvia	55
3.5. Valoración económica	59
3.6. Impacto medio ambiental	60
3.6.1. Afectaciones en las condiciones ambientales	61
3.6.2. Afectaciones al medio por emisiones de la flota vehicular	61
3.7. Conclusiones del capítulo 3	62
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍAS	
ANEXOS	



Resumen

El objetivo principal de esta investigación es determinar el consumo de combustible por parte del parque automotor que se emplea en la fabricación de un dique a partir del rechazo minero para el depósito de cola. Se establecieron pruebas de laboratorio como: hidrometría, la humedad óptima, prueba proctor estándar, las cuales permitieron extrapolar los resultados obtenidos con el consumo de combustible. Se relacionaron los equipos con que se realiza la transportación del rechazo minero, así como, la determinación del consumo de combustible teniendo en cuenta períodos de seca y período de lluvia, constatándose que en los tiempos de seca hay un mayor ahorro de combustible que en los tiempos de lluvia, todo caracterizado por las características del terreno en cuanto a componentes como el porcentaje de arena, gravilla, cieno y limo. Finalmente se establece la valoración económica del procedimiento y el impacto medio ambiental.



Abstracts

The principal objective of this investigation is to determine the consumption of fuel for part of the automotive park that is used in the manufacture of a dike as from mining rejection for the deposit of tail. Tests of laboratories became established like: Hydrometry, the optimal humidity, test standard proctor, which permitted extrapolating the results obtained with the consumption of fuel. The teams with that the transportation of mining rejection is accomplished had total success, thus like, the determination of the consumption of fuel taking into account periods of sandbank and period of rain, becoming verified than in the times of sandbank a principal has saving of fuel than in the times of rain, whole characterized by the characteristics of the plot of land as to components like percent of sand, gravel, mud and slime. Finally the evaluation cheap to run of the procedure and the half-way environmental impact are established.



INTRODUCCIÓN

Los suelos son el más antiguo de los materiales de construcción y el más complejo de cuantos se conocen. Su variedad es enorme y sus propiedades variables en el tiempo y el espacio, son difíciles de entender y medir. El siglo XX constituyó el de mayores esfuerzos de los científicos para resolver los problemas que enfrentaba la Mecánica de Suelos y con ello el diseño y construcción de presas de tierra.

La importancia de este tipo de obra para la vida del hombre y su desarrollo social es ampliamente conocida. En Cuba no estamos al margen de esto y por ello, a partir del triunfo de la Revolución, se han proyectado y construido un gran número de grandes, medianas y pequeñas presas de materiales locales (tierra y enrocamiento).

La magnitud de las fallas en presas de materiales locales varía, desde lo que pudiera llamarse una catástrofe, que produce grandes pérdidas en vidas y bienes, hasta deterioros más o menos ligeros, que inclusive pudieran no requerir ningún trabajo de reconstrucción. Las fallas catastróficas han ocurrido por ruptura de la cortina bajo el empuje de agua o por rebase del agua sobre la cortina en avenidas extraordinarias; en el primer caso se produce naturalmente una ola cuyos efectos aguas abajo son fáciles de adivinar; en el segundo caso suele producirse la destrucción total o casi total de la estructura, pues aunque a veces se han reportado rebases de consecuencias no catastróficas, ha de considerarse, como una regla general, que una cortina de materiales locales no puede diseñarse en forma segura como sección vertedora.

La producción de residuos está en constante aumento debido al desarrollo creciente de las actividades humanas, generándose muchos tipos de residuos, según los procesos de origen. En líneas generales, los residuos pueden clasificarse según su naturaleza en:

- Residuos orgánicos
- Residuos inorgánicos



Las mudanzas de población generan considerables volúmenes de residuos domésticos de características muy variadas: plásticos, vidrios, metales y desechos orgánicos. El estudio de estos materiales cae dentro de un área de interés, con variadas aplicaciones, orientadas a veces hacia la reutilización de una fracción que puede ser reciclada mediante procesos agrícolas o industriales. En otros casos se pretende, simplemente, almacenar los residuos sin originar problemas físicos, geográficos y ambientales.

Las centrales térmicas de carbón dan origen a dos tipos de residuos: escorias y cenizas volantes. Estos materiales constituyen un grupo aparte, debido a su actividad puzolánica, que les confiere propiedades especiales variables a lo largo del tiempo a consecuencia de la cementación que se desarrolla entre las partículas. Los mismos han sido empleados con éxito en la construcción de terraplenes y rellenos hidráulicos.

La **situación problemática** de la investigación la constituye:

La Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" genera dos tipos de residuos: escombros rocosos y térreos y productos de lavadero, constituidos por materiales sólidos: secos o mezclados con agua, con propiedades que varían según el tipo de explotación y el material de origen, para evitar afectaciones al medio ambiente estos residuos son depositados en presas que son construidas a partir del propio escombro minero, ya que el empleo de materiales de la construcción encarecerían el proceso, por los cambios climáticos que se originan en nuestro municipio con períodos largos de lluvias, donde además por esta causa provoca alteraciones en el consumo de combustible del transporte destinado a esta actividad. Estos diques o presas tienden a deslizarse y provocar afectaciones al medio. Aunque se reparan los mismos, luego de un tiempo de almacenamiento vuelve a ocurrir el fenómeno donde se considera que no se precisan los detalles del diseño para la construcción del mismo.

La prioridad y ordenamiento a tener en cuenta en el diseño va a depender de muchos factores, pero entre los más comunes y determinantes está la selección del tipo de suelo a utilizar en la construcción de la cortina y la forma de colocar



estos en cuanto a humedad, peso específico seco, energía y tipo de compactación a emplear en la construcción, lo cual a su vez definen el equipamiento automotor y el consumo de combustible a emplear en correspondencia con la calidad del suelo.

El **problema** a investigar lo constituye

Aún es insuficiente el estudio relacionado con el diseño de los diques de almacenamiento de colas que son fabricados a partir de las propiedades mecánicas del escombros minero y que permita el ahorro de combustible en el transporte que se emplea.

Como **objeto de la investigación** se establece

Diseño de diques de almacenamiento de colas con mejor compactación que permita el ahorro de combustible.

El **campo de acción** es

Resistencia mecánica del escombros minero para el diseño de diques de almacenamiento de colas, con su fundamentación en el ahorro de combustible.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**

Es posible realizar el diseño de un dique para almacenamiento de colas donde se consideren las propiedades mecánicas del escombros minero como: la humedad, la densidad y la granulometría, que garantice la adecuada compactación del mismo, así como un máximo aprovechamiento del recurso combustible.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**

Realizar el diseño de un dique para almacenamiento de cola donde se consideren las propiedades mecánicas del escombros minero, así como el comportamiento del consumo de combustible.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**

1. Caracterizar el escombros minero considerando las características que presenta el mismo y el uso de camiones empleado en el depósito y compactación del suelo.



2. Establecer la secuencia metodológica para realizar el diseño del dique que se emplea en el almacenamiento de cola que permita un mejor aprovechamiento del transporte utilizado, así como considerar el comportamiento del combustible en tiempo de seca y en tiempo de lluvia.
3. Elaborar probetas del "préstamo", así como "in – situ" que permitan establecer el comportamiento de la compactación del terreno para la fabricación de la presa y que a su vez elimine la transportación innecesaria de mineral.
4. Interpretación de los resultados obtenidos a partir de los ensayos, con el objetivo de caracterizar el escombros minero.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Establecimiento del procedimiento de cálculo que permita el diseño del dique a partir de las propiedades mecánicas del escombros minero y que a su vez permita la disminución de combustible.
3. Observación de la ejecución experimental del proceso para la determinación de las propiedades del escombros minero en tiempo de seca y de lluvia que permitan establecer el comportamiento de la compactación del terreno según la disponibilidad de equipo.
4. Análisis de los resultados y fundamentación de las características del terreno para la fabricación de la presa, así como el índice de consumo de combustible de los equipos empleado en dicha construcción.

Capítulo 1

Marco teórico. Antecedentes investigativos

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

El diseño y construcción de una presa de materiales locales se realiza con el objetivo de garantizar que no se produzcan fallas graves o catastróficas a lo largo de su vida útil. Entre las principales fallas, en orden de mayor a menor ocurrencia se encuentran: el rebase de la cortina, sifonamiento mecánico, agrietamiento transversal, deslizamiento del talud aguas abajo, sismos, licuación y pérdidas por filtración.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2. Definición de presas de relaves

Las presas de relaves son obras que se construyen para contener en forma segura los relaves provenientes de una planta de beneficio de minerales, principalmente por flotación.

Los relaves están compuestos por material molido y agua con reactivos. Un tranque de relaves (figura 1.1), está formado por un muro de contención, construido normalmente con la fracción gruesa del relave y una cubeta. En la cubeta los sólidos finos sedimentan y en la superficie se forma una laguna de aguas claras.

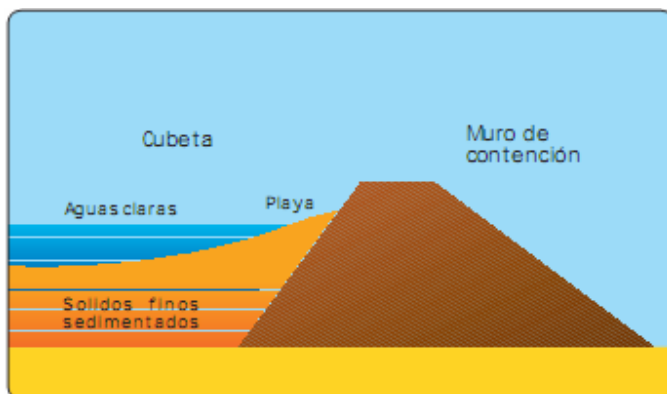


Figura 1.1. Partes de una presa o tanque de relaves.

Las normas más importantes están contenidas en el Decreto No 86/70, donde se regula la forma de diseñar, construir y operar un tranque de relaves. Existen otras

leyes y normas que se aplican para la protección ambiental de aguas, suelos y aire, pero la mayor información sobre este tema se puede obtener en las oficinas regionales del SERNAGEOMIN.

1.2.1. Generalidades sobre presas de relaves

En primer lugar, es necesario definir que es una balsa de decantación, para lo cual puede comenzarse diciendo que es un recinto capaz de contener y almacenar lodos de desecho, ya sean estos procedentes de una operación minera o de una industria.

De esto se desprende que las partes de una balsa de decantación han de ser:

- Una estructura de cierre perimetral, que puede ser natural o artificial.
- Un espacio disponible para el vertido de la suspensión de lodos.

Este espacio, al explotar la balsa, se divide en dos partes: una que contiene los lodos sedimentados y otra que contiene las aguas claras bajo las que el residuo ya ha decantado.

La figura 1.2, presenta el esquema de una balsa de decantación y sus partes según la ubicación del punto de vertido de los lodos.

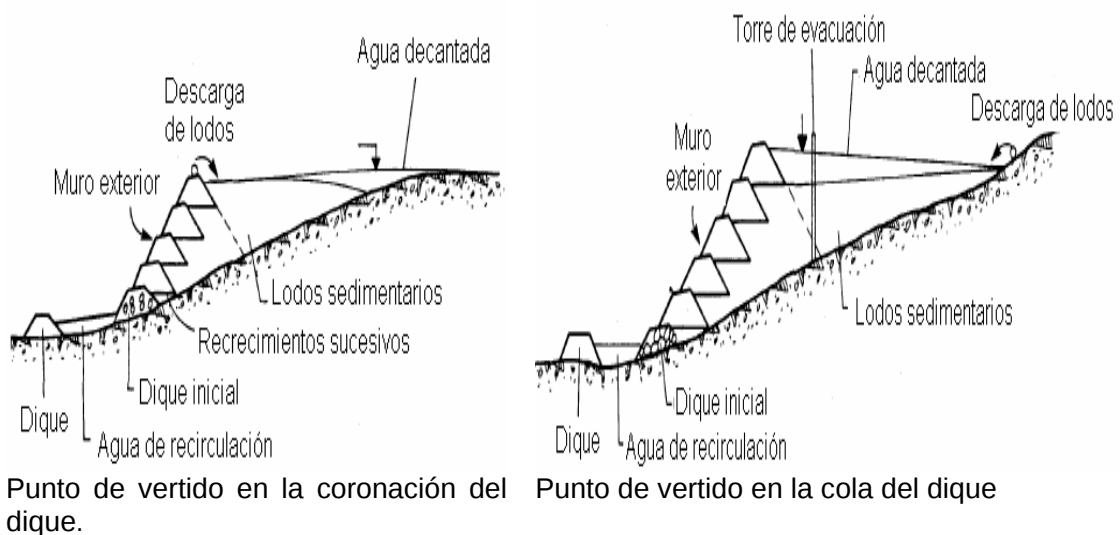


Figura 1.2. Partes de una balsa de decantación según el punto de vertido.

Coleman (1962); Abdrabbo *et al.* (2000), coinciden en plantear que el vertido de la cola en la balsa presenta una situación más desfavorable desde el punto de vista de la estabilidad del cierre perimetral, pues existe el empuje de agua contra el

dique exterior. Sin embargo, esta solución suele ser bastante frecuente por ser deseable que el transporte de los lodos desde la planta a la balsa ocurra por gravedad y con el menor recorrido posible.

Según Adams *et al.* (1996), Anderson *et al.* (1997), en muchos casos el punto de vertido se ubica en la cola del depósito, en otras ocasiones, el factor condicionante para el emplazamiento de una presa de residuos es la topografía del conjunto, que determina la geometría de gran parte de las instalaciones y por tanto, generalmente, el problema consiste en diseñar una balsa de decantación estable en un entorno dado, manteniendo fijos una serie de aspectos, tales como el sistema de vertido y la ubicación de los puntos de descarga.

1.3. Propiedades mecánicas de los suelos

Las propiedades mecánicas de los suelos pueden resultar seriamente afectadas por las perturbaciones originadas por el proceso de toma de las muestras. Estudios recientes han demostrado que las propiedades dinámicas son más sensibles a las perturbaciones de las muestras que las estáticas (Tokimatsu y Hosaka, 1986 y Kokusho, 1987).

Los métodos para la resistencia a la licuación de muestras de los suelos se obtienen mediante una toma de muestras convencionales y mediante el método de congelamiento "in-situ", es el último método, desarrollado en Japón hace más de 20 años (Yoshimi *et al.*, 1978), es quizás el mejor para extraer muestras de arena de alta calidad. Sin embargo, se usa muy poco porque resulta excesivamente costoso en la mayoría de los casos.

Estudios previos (Seed, 1979), han permitido comprobar que este último factor influye notablemente sobre la tendencia al cambio de volumen de los suelos granulares, durante la aplicación de cargas cíclicas en condiciones no drenadas.

Plantea Fourie *et al.* (2001), que todos los efectos anteriores, aumentan notablemente cuando se ensayan muestras enteramente reconstituidas en el laboratorio aún logrando la misma densidad que in-situ. En este tipo de muestras la resistencia a la licuación varía en función de su densidad, respecto a la resistencia real que se obtiene mediante ensayos "in-situ".

Debido a ello, las resistencias a la licuación en campo pueden estar por lo general, entre un 15 y un 50 % mayores que las obtenidas con ensayos de corte simple cíclico y entre un 30 y un 45 % menores que las determinadas con ensayos triaxiales cíclicos (Das, 1981).

Por su parte Casagrande (1976) y Olivilla *et al.* (1996), afirman que las arenas densas cuando llegan al punto de presión efectiva nula provocado por una carga de corte cíclico, inician el proceso de rotura. Tal proceso, sin embargo, es dilatante y por tanto provoca una disminución de presión intersticial y un aumento de resistencia en la rotura. El efecto final es que la arena experimenta una deformación tangencial apreciable y que en su interior las presiones intersticiales son importantes. Este fenómeno ha sido denominado "movilidad cíclica".

Plantean Lara y Barrera (2002) que los suelos no saturados que contienen minerales arcillosos como la illita, la caolinita y la montmorillonita tienen tendencia a hinchar cuando se ponen en contacto con el agua.

Lambe y Whitman (1959), se han referido exhaustivamente a estos minerales, y consideran que el potencial de expansión de los minerales arcillosos expansivos depende de los siguientes factores: estructura de los cristales, estructura del grupo de cristales y capacidad de intercambio catiónico

1.3.1. Estructura de los suelos

La estructura interna que presentan los suelos es un aspecto de gran importancia en el comportamiento mecánico de estos. Así, por ejemplo, bajo las mismas condiciones de carga, para un suelo con una estructura abierta se produce un colapso durante el mojado del suelo, sin embargo, en el mismo suelo y en condiciones de carga, pero con una estructura más compacta se puede producir un hinchamiento al mojarlo (Barrera y Lara, 1998).

Los autores Valenzuela y Barrera (1995), han estudiado el comportamiento de las arcillas considerando que tienen una estructura floculada, o una dispersa, aplicando la teoría de la capa doble difusa. No obstante, los conceptos se desarrollaron para dispersiones coloidales, y no pueden aplicarse más que en casos muy particulares, por ejemplo, en arcillas marinas. La teoría de la capa

doble difusa trata de explicar las fuerzas de los contactos en función del tipo de estructura floculada (de tipo abierta, con numerosos contactos cara-borde), o dispersa. Con base en dicha teoría, las caras de las partículas de arcilla están cargadas negativamente, mientras que los bordes, positiva y negativamente; de este modo se generan los contactos cara-borde, o borde-borde.

En la actualidad se considera la estructura interna del suelo de forma simplificada, teniendo en cuenta tres tipos de elementos (Alonso *et al.*, 1987): partículas elementales, agregados de partículas y poros.

A partir de estos elementos se pueden establecer tres estructuras fundamentales que simplifican el conjunto de todas las estructuras posibles (Rojas-González, 1985). Cuando las partículas elementales se distribuyen de manera homogénea, se considera una estructura de tipo matricial, con granos de arena rodeados de partículas arcillosas elementales creando una matriz. A veces las partículas elementales se agrupan como si fueran un grano de tamaño mayor. En este caso se dice que hay una microestructura de agregados. Finalmente, puede considerarse una estructura de granos de arena con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directos, sin partículas de arcilla.

Según Jiménez y Justo (1975), algunos materiales arcillosos de baja y mediana plasticidad presentan un comportamiento combinado de expansión y colapso cuando se les satura. El cambio neto de volumen que experimenta un suelo arcilloso cuando se pone en contacto con el agua es la suma de dos términos, por un lado, la expansión que se produce al relajar los esfuerzos netos entre partículas y por otro el colapso que ocurre al fallar las uniones entre grandes partículas. La deformación que se atribuye al hinchamiento puede ser elástica; no así la que corresponde al colapso. Esta última implica un reordenamiento de la estructura y es irreversible.

Un mismo suelo suele sufrir expansión o colapso, o ningún cambio de volumen de acuerdo con la densidad seca, humedad, y presión aplicada en el momento en el que se inunda, como señalan Jennings y Kenight (1975), según estos autores hay un cruce en las curvas obtenidas en los ensayos realizados en un doble



endómetro, que separa la zona de hinchamientos probables, de la zona de colapsos probables.

1.3.2. Suelos compactados

Según Surendra (1984), la compactación es uno de los varios procedimientos de mejora de un suelo que interviene en la construcción. Por sus características, dentro de los procedimientos de mejora del terreno, se define como un método mecánico basado en la expulsión del aire que ocupan los poros del suelo, y en la reducción rápida del índice de vacíos a humedad constante. Se aplica en la construcción de rellenos artificiales como presas, terraplenes, caminos y en algunas ocasiones en terrenos naturales, como en el caso de las cimentaciones sobre arenas sueltas.

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales compactados y de las condiciones de trabajo de los mismos en la estructura que se construye, son indispensables para dimensionarla y asegurar su estabilidad. Por esta razón, se han desarrollado procedimientos y técnicas experimentales de laboratorio, e in situ, que han tratado de reproducir los procesos de compactación reales (Troncoso, 1985).

Wood y Budhu (1981), afirman que el objetivo básico de la compactación de un suelo es obtener un nuevo material (suelo compactado) que tenga un comportamiento adecuado para la aplicación específica. Esta genera en el suelo deformaciones permanentes que modifican sus propiedades originales causando, entre otros, los efectos siguientes:

- ✓ Densificación del suelo (aumento de la densidad seca),
- ✓ Aumento de la resistencia mecánica,
- ✓ Aumento de la rigidez,
- ✓ Reducción de la permeabilidad,
- ✓ Reducción de la erosión.

Estos son algunos de los efectos más importantes, pero también altera la estructura del suelo y modifica la anisotropía mecánica (Rico y del Castillo, 1976).

Según Poorooshasb (1961), los parámetros de estado son definidos como aquellas variables suficientes para describir su estado sin necesidad de hacer referencia a su historia previa. Para el caso de suelos normalmente consolidados de acuerdo con Henkel (1960), Poorooshasb (1961) y Holubec (1966), son suficientes como parámetros de estado: el índice de poros o contenido de humedad, y el estado de esfuerzos. Para el caso de los suelos parcialmente saturados, se deberá añadir el grado de saturación y la estructura del suelo. Brackley (1973), afirma que el comportamiento del suelo puede ser definido por la carga exterior, el índice de poros, la succión y la humedad.

1.3.3. Composición mineralógica de las fracciones del suelo

Desde el punto de vista mineralógico, existen ciertas relaciones generales entre las fracciones granulométricas y los minerales que las componen (Soderberg y Busch, 1977).

A medida que las partículas minerales disminuyen de tamaño, aumenta su superficie específica y también su susceptibilidad a los procesos de alteración química.

En consecuencia, las diferencias de estabilidad de los minerales serán un importante factor que determine el cambio en composición mineralógica con el tamaño de partícula. Estos cambios son particularmente marcados a medida que nos aproximamos al tamaño de la fracción arcilla.

Normalmente la composición mineralógica de las fracciones arena y limo se considera separadamente de la fracción arcilla. Esta distinción resulta de las diferencias marcadas en composición mineralógica, y en consecuencia, los métodos usados para la determinación de la mineralogía de la arena y limo por un lado, y de la arcilla por otro.

✓ Fracciones arena y limo

Las partículas de arena más bastas son casi siempre fragmentos de roca, sobre todo de cuarzo, existiendo además cantidades variables de otros minerales primarios. La composición mineralógica de estas fracciones sigue los principios

vistos anteriormente y varía para los distintos suelos según la roca madre y el grado de meteorización.

✓ **Fracción arcilla**

En esta fracción se encuentran generalmente diversos minerales secundarios. Convencionalmente se pueden clasificar en silicatos y no silicatos. Los silicatos incluyen la caolinita, montmorillonita, illita, vermiculita y alofán, entre otros. La variación que existe entre estos grupos de arcillas en plasticidad, cohesión, adhesión, capacidad de intercambio catiónico y otras propiedades es muy grande. Por eso, es un dato de considerable importancia el saber qué tipo de arcilla domina en un suelo o cuáles coexisten.

Los no filosilicatos incluyen: cuarzo y otras formas de sílice (SiO_2); óxidos e hidróxidos de hierro, tales como hematita o goethita; óxidos e hidróxidos de aluminio tales como gibbsita; y carbonato de calcio. Parte del material mineral de la arcilla de los suelos es cristalino y parte amorfo.

1.4. Propiedades geotécnicas de los lodos

Los lodos, lamas o residuos, son materiales artificiales, originados mediante procesos muy diferentes incluso dentro de un mismo tipo de explotación. Es más, dado que la vida útil de una explotación suele estar comprendida entre 20 y 50 años, los lodos de la misma planta varían sus propiedades con el tiempo debido a que el proceso de extracción suele variar, pues se van haciendo ajustes en la producción a la vez que se optimizan las técnicas con el objetivo de lograr mayores rendimientos, produciéndose variaciones en las canteras de origen. De ello se desprende la necesidad de realizar en cada caso los ensayos y estudios oportunos, a fin de poder llevar a cabo un diseño racional, seguro y económico (Barrera *et al.*, 2002).

El comportamiento geotécnico de los lodos es muy diferente del que experimentan los suelos naturales de propiedades índices similares (Cui y Delage, 1996). La razón de esto es la angulosidad de las partículas que constituyen los lodos (la cual se observa incluso en las fracciones más finas) y la eliminación de partículas



débiles por el lavado y transporte. Esto determina, en muchos casos, un elevado valor del ángulo de rozamiento interno.

Vick (1981), clasifica los residuos mineros en cuatro categorías, atendiendo a la granulometría y plasticidad de los mismos. La tabla 1.1 presenta esta clasificación. Como puede verse en la misma, los mayores problemas corresponden a los materiales más finos, pues estos requieren largos períodos de sedimentación y consolidación y, por lo tanto, resulta necesario disponer de grandes extensiones de estanque para la decantación, lo cual presenta problemas de volumen de almacenamiento, que, en algunos casos, pueden ser bastante graves.

Tabla 1.1. Clasificación de los residuos mineros. Fuente (Vick, 1981)

No	Clase	Características generales
1	Residuos de roca blanda Carbón Potasa	Contiene fracciones limosas y arenosas, predominio de las propiedades de la fracción fina, debido a la presencia de arcillas
2	Residuos de roca dura Plomo-Zinc Cobre Oro-Plata Molibdeno Níquel	Contiene fracciones arenosas y limosas. Los limos son de plasticidad baja o nula. Las arenas controlan las propiedades geotécnicas.
3	Residuos finos Arcillas fosfáticas Lodos rojos de bauxita Lodos finos de taconita Lodos de arenas bituminosas	La fracción arenosa es pequeña o se encuentra ausente. El comportamiento del material está controlado por las fracciones limo-arcillosas.
4	Residuos gruesos Residuos de arenas bituminosas Residuos de Uranio Residuos de Yeso Residuos gruesos de taconita Arenas fosfáticas	Contiene básicamente arenas y limos no plásticos que exhiben comportamiento arenoso y excelentes propiedades geotécnicas.

Se han realizado varios estudios sobre el perfil de densidades en lodos ya sedimentados, pues es claro que la densidad no es homogénea, debido a que las partículas más gruesas se depositan rápidamente, mientras que las finas tardan más tiempo en caer. Por ello, generalmente, hay densidades mayores en el fondo de los tanques de sedimentación. Been y Sills (1981) han estudiado el fenómeno

para lodos de estuario, empleando tanques de sedimentación de dos metro de altura y un metro de diámetro.

El estudio de los residuos en el laboratorio lleva al planteamiento de metodologías especiales de ensayo; algunos autores, entre ellos Guerra (1983) han estudiado muestras secas a baja densidad relativa y otros autores, especialmente Been y Sills (1981), han estudiado los lodos de estuario mediante técnicas de vertido de suspensiones de concentraciones variables.

1.5. Influencia del agua capilar

Buena parte del volumen de un depósito de relaves (de hecho todo lo que está por encima de la superficie freática) se encuentra permanentemente en una condición de saturación parcial. Es decir que los poros del material están llenos con más de un fluido (comúnmente aire y agua) y debido al fenómeno de tensión superficial, la presión de agua es inferior a la atmosférica. En esta zona "no saturada" tienen lugar una serie de fenómenos singulares tales como infiltración, evaporación, ascenso capilar, retracción, agrietamiento (Delage *et al.*, 1998).

Según Gens (1993), la capacidad de las granulometrías finas contenidas en un relave típico para provocar ascenso capilar es enorme. El ascenso capilar hace que el material por sobre la superficie freática mantenga un grado de saturación elevado, cercano al 100 %. La presencia en un depósito de grandes volúmenes de material en ese estado de cuasi-saturación puede constituir un factor que incremente el peligro de falla, ya que aportes relativamente pequeños de agua, provenientes de lluvia por ejemplo, pueden producir ascensos de la superficie freática inesperadamente rápidos. Además esta agua capilar no puede ser drenada por gravedad y su presencia no se detecta con piezómetros.

Zandarín *et al.* (2008), mostró que el agua almacenada en la zona no saturada (agua capilar) de una presa de relaves, puede ser uno de los factores determinantes de la respuesta hidráulica del depósito ante aportes de agua extraordinarios, como lluvias, deshielo, crecidas y en definitiva un factor determinante de su estabilidad. Con el objetivo de ilustrar este fenómeno y para medir sus posibles efectos, se realizó la modelación matemática de un caso real.

Se trata de una presa de relaves de la Industria Cubana del Níquel, que está fundado sobre la llanura de inundación del río Moa, rellenando la depresión de un área pantanosa.

La modelación de este caso de estudio se llevó a cabo mediante un programa de elementos finitos denominado Code Bright (Olivella *et al.*, 1996), que permite resolver de forma acoplada los problemas mecánico (consolidación y deformación bajo la carga creciente de los relaves vertidos) y de flujo de agua, tanto en condiciones saturadas como no saturadas (drenaje, infiltración, evaporación, ascenso capilar). Una vez ajustado el modelo a partir de la geometría del problema, los datos de caracterización de los materiales (propiedades mecánicas e hidráulicas) y las condiciones de borde del problema (lluvia, evaporación posición de la laguna), se obtienen resultados que se pueden utilizar para medir la importancia relativa de los diferentes fenómenos considerados, en el comportamiento global del depósito.

La superficie freática experimenta un rápido ascenso durante la tormenta de lluvia. Esto se debe a que el agua infiltrada satura rápidamente los poros, ya parcialmente llenos con agua capilar, la aproximación del agua freática al talud exterior de la presa tiene un fuerte efecto desestabilizante, por una parte por efecto de las fuerzas de filtración que genera el flujo de agua, pero también por la pérdida de la cohesión aparente, que depende del agua capilar, al ocurrir la saturación.

Por otra parte, al examinar el comportamiento del modelo una vez pasada la tormenta, se descubre que el proceso de descenso de la superficie freática, después de detenido el aporte externo de agua, se desarrolla en un período de tiempo mucho más largo que el ascenso.

Esto se debe a la baja conductividad hidráulica de los relaves, que hace que el proceso de drenaje sea lento. Esta característica lleva a pensar en los efectos acumulativos que tendrían eventos de lluvia repetidos en un corto periodo de tiempo. De hecho, aproximadamente un tercio de los casos de falla de presas de relaves, por sobrepaso o deslizamiento, recopilados en el Boletín 121 del ICOLD



(2001), fueron precedidos por períodos más o menos prolongados de lluvias repetidas.

1.5.1. Control del agua en presas de residuos

Generalmente el agua es un factor fundamental a la hora de estudiar la estabilidad en presas. Es necesario considerarla desde dos vertientes: Por un lado, la determinación de los caudales de agua que pueden presentarse en un momento dado y, por otra parte, la forma como se evacúan estos caudales. Esto nos lleva a la necesidad de estimar las posibles avenidas asociadas a diferentes períodos de retorno y a la determinación de la posición de la línea de saturación en el cuerpo de la presa asociada a cada una de ellas (Rodríguez (2002).

En el diseño de una presa de residuos deben preverse instalaciones de retención o desvío de las aguas de escorrentía, sistemas de evacuación y recuperación de las aguas decantadas. Estas obras se proyectan aplicando procedimientos análogos a los empleados en presas de tierra convencionales, tomando las debidas precauciones en los casos de efluentes corrosivos y en el análisis de los empujes de los lodos sobre el cuerpo de la presa.

En el estudio de las filtraciones a través del dique es fundamental el diseño, construcción y operación de una presa de este tipo pues es el principal condicionante de la estabilidad de la obra. Para esto deben evaluarse los siguientes aspectos:

- Caudales filtrados a través del dique y su cimentación.
- Posición de la línea de saturación.

La evaluación de los caudales filtrados a través del dique y su cimentación afecta el dimensionamiento de los órganos de desagüe y el balance del agua; pero además, en el caso de residuos cuyos efluentes sean peligrosos para el medio ambiente por razones de toxicidad, agresividad, radioactividad u otras será necesario impedir el escape de estas aguas, mediante el diseño de las estructuras que se juzguen más convenientes en cada caso; pueden emplearse soluciones de soleras, pantallas, dentellones impermeables, obras de conducción y desvío.

La evaluación de los caudales de filtración y la posición de la línea de saturación, pueden hacerse empleando métodos de cálculo analíticos o soluciones gráficas basadas en el dibujo de la red de filtración que cumpla con las condiciones de contorno del problema a estudiar. Esto último solo es sencillo en el caso de régimen permanente.

1.6. Explotación de la balsa

Una vez seleccionado el emplazamiento, se determinan las posibles geometrías de los diques de cierre que generalmente suelen estar condicionadas por la topografía. Posteriormente, se determina el proceso constructivo más adecuado en función de las restricciones existentes en esta etapa de proyecto en cuanto a los siguientes aspectos: sistema de vertido de los lodos, potencial contaminante de los residuos, existencia de materiales de préstamo o volúmenes de arenas procedentes de los residuos, velocidad de construcción requerida para satisfacer las necesidades de almacenamiento, condiciones de estabilidad del conjunto de la obra y tecnologías constructivas disponibles.

Una vez definida la ubicación de la balsa y la geometría de los diques de cierre perimetral, es importante el estudio de la relación entre los volúmenes de dique y el volumen de lodos almacenados; conocida como eficiencia de llenado de la balsa. Este término empleado por Coates y Yu (1977), permite comparar diversas soluciones desde el punto de vista económico, pues el volumen de dique es un buen indicador del costo de la obra y la capacidad de almacenamiento indica el beneficio que se obtiene. Esta técnica de evaluación penaliza los diques muy elevados, en especial aquellos que deben sobreelevarse para permitir el almacenamiento de grandes volúmenes de agua. En el caso de explotaciones durante períodos de tiempo muy largos, suele ser mejor el empleo de diques sucesivos frente a la alternativa de un gran dique en la cola de la cuenca.

1.7. Consecuencias de la rotura de presas de relaves

El comportamiento de los relaves mineros una vez ocurrida la rotura es sumamente variable. En general, podemos decir que las roturas que han resultado más destructivas han sido las que han involucrado: 1) escape de grandes

volúmenes de relaves, 2) gran distancia recorrida por la avalancha, 3) elevada velocidad de avance de la avalancha. Estas condiciones se han dado cuando ha ocurrido lo que se conoce como "falla de flujo" o "licuación estática" de los relaves.

El ángulo de reposo del material licuado, una vez que ha detenido su movimiento es extremadamente bajo (2°), signo de que la resistencia al corte de los relaves licuados era realmente ínfima (Bafokeng, 1974).

El único factor que parece tener una clara influencia en el desarrollo de fallas de flujo, es la humedad de los relaves al momento de la rotura. En todos los casos de rotura con consecuencias graves, los errores de operación hidráulica y la ocurrencia previa de lluvias, parecen haber sido ingredientes presentes en la falla de flujo. Blight (1997), midió la resistencia al corte de relaves saturados con diferente contenido de humedad. A bajas humedades las resistencias fueron medidas mediante el ensayo de veleta. A altas humedades el material se comporta como un líquido viscoso (lodo) y por lo tanto se utilizó un viscosímetro.

El comportamiento de los relaves en relación a la licuación estática es contradictorio y su comprensión es aún incompleta. La licuación estática de los relaves vertidos en la rotura de la Presa Los Frailes (Alonso y Gens, 2006), que recorrieron 24 km antes de detenerse, se contradice con los taludes casi verticales de los restos del mismo material, que quedaron dentro del depósito. Con el conocimiento actual, es imposible explicar por qué una parte de estos relaves licuó, mientras un material prácticamente idéntico, vecino al material licuado, mostró una cohesión suficiente para mantener en pie taludes de varios metros de altura. En el mismo sentido, subsiste la incógnita de por qué algunos casos de rotura históricos han desarrollado fallas de flujo con consecuencias catastróficas y otros no.

1.8. Características de los residuos mineros y formas de manejo

A fin de facilitar la comprensión de los procesos que intervienen para lograr el manejo ambiental de los residuos mineros y su disposición segura, se resumen a continuación algunos aspectos básicos.



Los residuos mineros son los conocidos como colas (tailings), relaves o jales; los cuales son generados durante los procesos de recuperación de metales a partir de minerales metalíferos tras de moler las rocas originales que los contienen y mezclar las partículas que se forman con agua y pequeñas cantidades de reactivos químicos que facilitan la liberación de los metales.

Un mineral típico puede contener alrededor de 6 por ciento de zinc y 3 por ciento de plomo, que al ser concentrados generan alrededor de 850 kilogramos de residuos sólidos y una cantidad equivalente de agua conteniendo cerca de un kilogramo de sustancias químicas residuales por cada tonelada de mineral procesado. Al producto concentrado se le llama cabeza y al residuo se le denomina cola (Chalkley *et al.*, 2002).

Plantean Chandler y Tosatti (1995), que la mayoría de los relaves o jales se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos que en cierta manera se comporta como un suelo, por lo que aplican para su caracterización los principios de la mecánica de suelos; a condición de que se reconozcan los procesos de consolidación que tienen lugar y la forma en que fluyen los lodos. Entre las diferencias que tienen en estos residuos con respecto a los suelos comunes, se encuentran el hecho de que su densidad y cuerpo son inicialmente bajos y crecen con el tiempo.

Frecuentemente, para conservar y volver a usar el agua de proceso, así como para concentrar los lodos, se someten a un proceso de deshidratación hasta que alcancen una consistencia tal que facilite su transporte hacia las instalaciones de depósito, lo que ocurre cuando el contenido de sólidos es de 40 a 50 por ciento y el de agua de 100 a 150 por ciento respectivamente; lo cual constituye un lodo con propiedades de fluido. Los lodos son transportados a las presas o depósitos mediante ductos, ya sea por gravedad o con ayuda de bombeo, y a través de *descargas* subaéreas o por métodos de descarga por inyección subacuosa, bajo el agua superficial. También, puede ocurrir que se remueva agua adicionalmente para crear una descarga engrosada o densa. La forma en que se depositan los



relaves en las presas influye de manera importante en su comportamiento y en la constitución de capas con diferente grosor de partículas y humedad (Armijo, 1995)

A medida que las partículas de los relaves se empaquetan bajo el efecto de la gravedad, se provoca el fenómeno de consolidación, el cual aporta tres beneficios: aumento de sólidos que pueden ser almacenados en un volumen dado; aumento del cuerpo del suelo por eliminación de agua y disminución de la cantidad de filtraciones hacia el subsuelo. Cuando el proceso se completa es común encontrar contenidos de 20 por ciento de agua unida a las partículas, aún en medios muy áridos con elevada evaporación (Alonso y Gens, 2006).

Según Chai *et al.* (2005), la permeabilidad de los relaves depositados en una presa es utilizada como un indicador de consolidación y potencial de filtraciones, como resultado del depósito segregado de partículas por influencia de la gravedad, la permeabilidad es mayor cerca del punto de depósito y disminuye progresivamente.

Un grave peligro, como consecuencia de fuerzas dinámicas como las que ocurren durante un terremoto, es la posibilidad de licuefacción de los relaves por la vulnerabilidad que les ocasiona el que se trate de depósitos débiles de partículas en un estado libre y saturado. En tales condiciones de ocurrir una fuga, los relaves pueden fluir a distancias considerables a gran velocidad y con consecuencias desastrosas (Domínguez, 2001).

Dichas consecuencias se agravan cuando los metales en los relaves se encuentran en forma de sulfuros y existe un gran potencial de generación de ácidos en presencia de oxígeno y agua. También, requieren particular atención los relaves que contienen otros elementos potencialmente tóxicos como el arsénico, los que presentan altas concentraciones del cianuro empleado en el beneficio de metales o los que pueden provocar la contaminación por sales utilizadas en los procesos salinos.

1.9. Empleo de transporte en la fabricación de presas de relaves mineros

El transporte es un factor fundamental en la fabricación de presas de relaves mineros, la transportación del escombros se realiza en ocasiones desde zonas

alejadas donde se desea realizar la construcción del objeto, también hay que considerar que para la adecuada compactación del terreno se requiere de equipos especializados denominados vibrocompactadores.

En las industrias del níquel cubana, en constante desarrollo y perfeccionamiento y un incremento cada vez mayor del ritmo productivo se requiere del depósito de la cola que se desecha, La calidad del material que se emplea y las condiciones climáticas entre otros aspectos influyen en el consumo de combustible Diesel asignado a esta tarea.

1.9.1. Equipos automotores de combustión interna

En la mina de la Empresa "Comandante Pedro Sotelo Alba" se emplean equipos automotores para la fabricación de presas, algunos de ellos son para la remoción del material (figura 1.3), una de las mayores ventajas que ofrecen los mismos es la disponibilidad técnica del transporte ya que utilizan para su automoción petróleo.



Figura 1.3. Equipos para la remoción del material.

La principal ventaja de los motores Diésel, comparados con los motores a gasolina, estriba en su menor consumo de combustible. Debido a la constante ganancia de mercado de los motores diésel en turismos desde los años 1990 (en muchos países europeos ya supera la mitad), el precio del combustible ha superado a la gasolina debido al aumento de la demanda (aunque en países como España sigue siendo inferior al de la gasolina). Este hecho ha generado grandes problemas a los tradicionales consumidores de gasóleo, como transportistas, agricultores o pescadores.

1.9.2. Vibrocompactadora

Se utilizan para compactar tierra o rellenos sanitarios; pueden estar equipados con un rodillo y dos neumáticos (figura 1.4), o tener dos rodillos lisos o de pisones; en algunos casos, poseen una pequeña cuchilla que les permite limpiar el terreno para su fácil desplazamiento. Se le antepone el nombre vibro, porque utilizan un sistema de vibración del rodillo para mejor compactación.

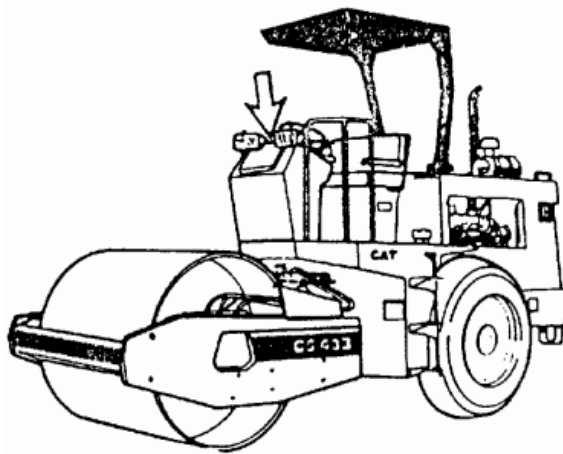


Figura 1.4. Vibrocompactadora.

Dentro de sus funciones se encuentran: compactar tierra y aplanar la tierra.

1.10. Ventajas de los motores de combustión interna

En automoción, las desventajas iniciales de estos motores (principalmente precio, costos de mantenimiento y prestaciones) se están reduciendo debido a mejoras como la inyección electrónica y el turbocompresor. No obstante, la adopción de la precámara para los motores de automoción, con la que se consiguen prestaciones semejantes a los motores de gasolina, presenta el inconveniente de incrementar el



consumo por lo que la principal ventaja de estos motores prácticamente desaparece.

El segundo factor de importancia es la capacidad volumétrica, teóricamente a mayor cilindrada mayor debería ser la capacidad de generar potencia; el tercer factor de relevancia es la cantidad de mezcla aire - combustible, que debe ser la adecuada, para lo cual se regula mediante carburadores o inyectores. A mayor caudal de carburante, mayor generación de calor y por ende mayor potencia emergente. Por eso la aparición de los sistemas de inducción de aire a presión en las modernas motos deportivas (RAM AIR).

El cuarto factor es la capacidad de giro del cigüeñal, medidos en revoluciones por minuto (rev/min.), a igualdad de cilindrada, obtiene mayor potencia el motor que gira a más revoluciones.

1.11. Caracterización de los motores Hyundai

Para la transportación del escombros, el cual se empleará en la fabricación de la presa de colas de la fábrica Pedro Sotto Alba son utilizados camiones Hyundai de gran potencia. Estos forman parte de equipos de última generación, siendo más significativo su empleo en equipos pesados y a pesar de que en su mayoría se consideran como equipos pesados poseen ventajas y desventajas que caracterizan su funcionamiento.

1.11.1. Generalidades de los motores Hyundai

Uno de los elementos fundamentales que poseen los equipos Hyundai actuales son los turbocargados. Cuando el turbocargado hizo su entrada en los motores Hyundai, el objetivo principal era el incremento en potencia de salida (e incremento de torque), combinado con economía de combustible. Las propiedades ambientales, operación silenciosa y emisiones de escape más limpias eran beneficios adicionales que no fueron considerados relevantes hasta mucho tiempo después, estos beneficios forzaron a los competidores de Hyundai a adoptar el turbocargado, aunque no quisieran hacerlo.



Después del éxito de los primeros tractocamiones turbocargados, Hyundai introdujo motores turbo (inicialmente como opción) en tractocamiones medianos y pequeños.

En 1963 se condujeron pruebas prácticas con un interenfriador como suplemento al turbocargado con la finalidad de mejorar la confiabilidad y extender la vida de servicio de los motores considerablemente más potentes. La tecnología funcionó a la perfección, pero en ese momento, no había una necesidad real para una potencia mayor y las transmisiones existentes no tenían márgenes suficientes para manejar el elevado torque producido.

La empresa Hyundai comenzó a utilizar la tecnología de "pistón articulado" en 1987. Los pistones articulados están hechos en dos partes de diferentes materiales y pueden controlar potencias de salida mayores sin poner en riesgo la vida útil o confiabilidad del motor, mientras contribuyen a un nivel de ruido menor y emisiones del escape relativamente bajas.

Para el año 1987 Hyundai introdujo también su primer motor de 16 litros, con cuatro válvulas por cilindro, para el año 1993 se presenció la introducción del motor más revolucionario de Hyundai, el D12A en el tractocamión modelo FH12.

Lo anterior provocó que Hyundai se convirtiera en el primer productor de vehículos con un motor diseñado en casa que caracterizaba no solo un turbocargado con interenfriador y cuatro válvulas, sino también un árbol de levas a la cabeza, con provisión de combustible a través de inyectores electrónicos y un freno de motor único y patentado, conocido como HEB (Freno de motor Hyundai, por sus siglas en inglés).

En el año 1995 Hyundai desarrolló su visión del tractocamión de distribución del futuro en forma de ECT (Concepto del Tractocamión Ambiental, por sus siglas en inglés), equipado con turbina a gas. Podía ser utilizado con una amplia variedad de combustibles, incluyendo aquellos que contribuyen a tener un ambiente más limpio. Esto se llevó a cabo en paralelo con un experimento de tractos híbridos que combinaba un motor tradicional a diesel con energía eléctrica para lograr el menor impacto ambiental posible al operar en áreas construidas, siendo en el año



1996 cuando Hyundai introdujo su motor D6A - 250 para turbocargado, con interenfriador u compresor mecánico o supercarga en el tractocamión FL6.

Hoy en día Hyundai ofrece variedad de soluciones centradas en vehículos ambientalmente optimizados para uso en ambientes vulnerables, como el motor G6B (motor de 6 litros o gas natural) y el filtro de escape. Durante 50 años Hyundai ha sido el único fabricante que continuamente ha producido tractocamiones con motores turbocargados. El desarrollo ha sido sostenido todo el tiempo.

En 1954 el Hyundai TD96AS ofrecía un torque máximo de 73 kilogramos-metro (correspondientes a alrededor de 715 Nm). El torque en el Hyundai D16C-610 2004, produce 2,500 Nm. En potencias de salida comparables, los motores actuales para tractocamiones de Hyundai, son más eficientes en combustible, silenciosos y producen emisiones más limpias que sus antecesores de hace 50 años.



1.11. Conclusiones del capítulo 1

- ❖ Los diques de relaves son el tipo de presas de mayor aplicación en la industria minera cubana debido a su bajo costo de construcción y fácil operación en relación a otros tipos de presas de relaves para el almacenamiento de los desechos conocidos como cola.
- ❖ Las inyecciones de compactación envuelven una serie de parámetros complejos, debido a las diferentes condiciones y propiedades del terreno, sin embargo con este procedimiento se logra mejorar la resistencia del suelo.
- ❖ Para el manejo, traslado y depósito del escombros minero se emplean camiones del tipo Hyundai, los cuales se caracterizan por ser económicos en el consumo de combustible, fuerza en su motor y capacidad de carga.

Capítulo 2

Materiales y métodos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La textura del suelo es precisamente la proporción de cada elemento del suelo, o dicho de otra manera, la textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena gruesa, arena media, arena fina, limo y arcilla. Se dice que un suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y su nutrición.

En el capítulo se plantea como objetivo establecer la metodología para determinar las propiedades mecánicas del rechazo minero, con el fin de verificar que el mismo pueda ser utilizado en la construcción de un dique. Y que todo se logre con el menor consumo de combustible posible.

2.2. Procedimiento para determinar las propiedades mecánicas del rechazo

El fenómeno de la compactación reviste gran importancia en múltiples áreas de la construcción como presas, vías y edificios; además de su correcto análisis y reproducción en el laboratorio dependen mucho otras pruebas que se realizan a los suelos.

Para establecer las propiedades mecánicas del rechazo minero para la fabricación de diques en la presa de cola se tendrán en cuenta elementos como:

- ✓ Muestreo de un suelo,
- ✓ Densidad in situ por el método de reemplazamiento de agua
- ✓ Contenido de agua en suelo,
- ✓ Análisis granulométrico,
- ✓ Límites de consistencia,
- ✓ Densidad seca máxima y humedad óptima por el método del Proctor estándar.

2.3. Materiales empleados en la experimentación

Para obtener la mejor compactación de un terreno o de materiales destinados a la fabricación de diques, se requiere de una cierta cantidad de ensayos para hacer representativos los resultados que se puedan obtener de la calibración.



Para desarrollar el trabajo experimental se emplearon los siguientes materiales:

- ✓ Molde de compactación de 0,94 lts y su extensión (ver anexo 1)
- ✓ Pisón de 2,5 kg de peso (ver anexo 1)
- ✓ Balanza de aproximación (0,1 gr)
- ✓ Balanza de aproximación (1gr)
- ✓ Horno eléctrico que mantenga la temperatura constante a 105 ± 5 °C
- ✓ Anillo de acero (ver anexo 2)
- ✓ Dos cinceles
- ✓ Martillo
- ✓ Cucharón
- ✓ Charolas y cápsulas de aluminio
- ✓ Vasos de aluminio
- ✓ Beaker con escala graduada de 2 000 ml
- ✓ Beaker con escala graduada de 1 000 ml
- ✓ 2 tanquetas con tapas (una con agua)
- ✓ 1 m² de nylon fino
- ✓ Vibrador electromecánico (ver anexo 3)
- ✓ Juego de mallas (3/4", 3/8", No4, No20, No40, No60, No100, No200 y la charola)
- ✓ Termómetro
- ✓ Cronómetro
- ✓ Hidrómetro
- ✓ Agua destilada
- ✓ Batidora eléctrica
- ✓ Probetas de 100 ml y 1 000 ml
- ✓ Pipeta
- ✓ Frasco con tapa de 500 ml
- ✓ Charolas rectangulares de 40x60 cm
- ✓ Espátulas
- ✓ Copa de Casagrande (ver anexo 4)
- ✓ Ranurador laminar
- ✓ Ranurador curvo

- ✓ Cápsula de porcelana
- ✓ Placa de vidrio
- ✓ Alambre de diámetro 3.2mm
- ✓ Cuchillo
- ✓ Brocha
- ✓ Regla o solera para enrasar
- ✓ Estopa para limpiar el molde
- ✓ Guantes de hule

Se analizó la configuración del terreno en el cual se debe construir el dique para la presa de cola. La figura 2.1 muestra la ubicación geográfica del terreno objeto de estudio.

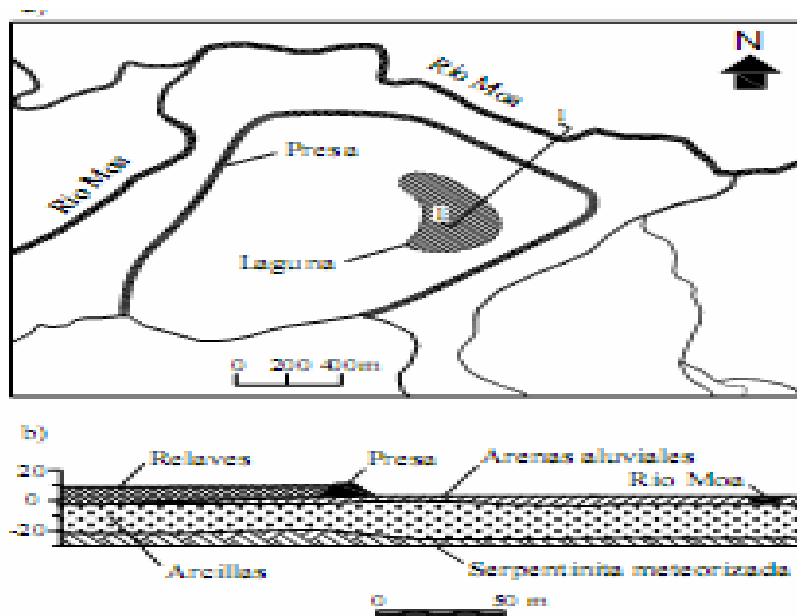


Figura 2.1. Ubicación geográfica del terreno.

Analizando las particularidades del terreno según la figura 2.1, hay que tener presente el comportamiento de la superficie freática por la cercanía del Río Moa, la vegetación, las estaciones del año ya que generalmente en nuestro municipio existen períodos largos de lluvia, lo que influye en el agua capilar lo cual conlleva a la modificación de las características del terreno y esto a su vez traería consigo menor rendimiento de los equipos que se utilizan en la construcción de los diques en los cuales se almacenan las colas.

Accesibilidad.

La zona que ocupa el depósito se encuentra rodeada por un conjunto de viales que son utilizados para las tareas de crecimiento de los diques, mantenimiento, inspección y monitoreo de la obra. Estos viales son terraplenes de material de préstamo lateríticos ubicados en sus inmediaciones.

La accesibilidad desde las áreas exteriores se produce desde la carretera a la mina y de esta al poblado La Veguita, otras vías de acceso provienen de la planta Comandante Ernesto Che Guevara y de la cantera de préstamo para los diques de la presa de cola. De forma general los viales están en malas condiciones, solo aptos para equipos pesados o ligeros con doble tracción.

2.4. Características constructivas de la presa de cola

En las dos últimas décadas se ha progresado bastante en el diseño ingenieril de las presa de residuos en lo relativo a hidrogeología geotecnia, ya que anteriormente en algunos casos, se procedía a realizar las operaciones de forma intuitiva. Por otro lado, dos factores que han contribuido notablemente a la mejora en el diseño y operación de las presas son los derivados de las exigencias de seguridad y protección ambiental.

Con relación al primero, en el pasado se produjeron accidentes con elevado número de pérdidas humanas y materiales debido a las roturas de las presa con grandes avalanchas de lodos y fangos.

Con respecto al segundo, se ha visto la necesidad de preservar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas durante el tiempo de operación de la presa y después de su abandono, así como la restauración de los terrenos.

Los factores que influyen en la elección de la ubicación y el diseño de las presas de residuos son de diversa índole, a continuación se muestran los más importantes.

Tabla 2.1. Factores que influyen en la ubicación y diseño de las presas de residuos mineros.

Factores locales.	Características de los lodos.	Características de los efluentes.	Limitaciones ambientales
▪ Geología. ▪ Sismicidad. ▪ Topografía. ▪ Red de drenaje. ▪ Condiciones de agua subterránea. ▪ Precipitaciones. ▪ Evaporación. ▪ Disponibilidad de terrenos. ▪ Precio de los terrenos.	▪ Producción de residuos. ▪ Contenido en arcilla. ▪ Composición química. ▪ Método de vertido. ▪ Densidad de los lodos. ▪ Lixiavilidad.	▪ Características químicas. ▪ Ph. ▪ Cationes metálicos. ▪ Potencial de oxidación / reducción. ▪ Toxicidad. ▪ Producción de efluentes. ▪ Capacidad de circulación. ▪ Necesidad de evaporación.	▪ Calidad del aire. ▪ Calidad de las aguas superficiales y subterráneas. ▪ Requerimientos de restauración. ▪ Drenaje del agua superficial.

El desarrollo de un depósito de cola implica por lo general una importante etapa de construcción, la fase de construcción es decir las actividades iniciales de conformación del depósito de los residuos con la ejecución de los diques perimetrales y las obras inducidas.

La fábrica Comandante Pedro Soto Alba utiliza este método y lo realiza de la siguiente forma: La presa es levantada por la construcción progresiva de diques perimétricos sobre la superficie de los residuos acumulados, de tal manera que cada dique avance sucesivamente hacia el interior conforme el depósito levantado.

La característica de este método es que la integridad estructural de la obra está gobernada por las propiedades y comportamiento de las colas inferiores descargados hidráulicamente los cuales forman la base del talud y diques superiores, como puede ser observado en la figura 2.2.

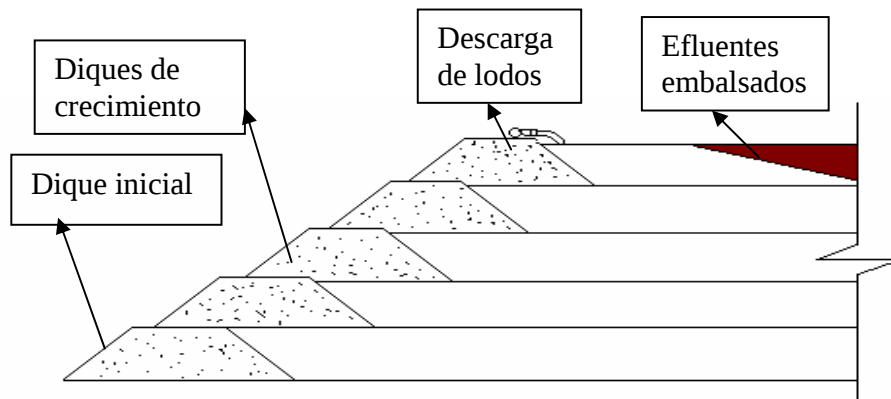


Figura 2.2: Sección transversal del método de construcción aguas arriba.

De acuerdo con la clasificación del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLI), por su altura es clasificada como grande, pues alcanza 40 m de altura.

A partir de los 15 m de altura se consideran grandes presas.

A la hora de construir los diques de la presa de colas se busca impermeabilidad y resistencia en los mismos; para esto se utiliza material de préstamo. Los diques se conforman por capas de 25 - 30 cm, (ver anexo 6). Donde la primera capa queda sobre la cola y tiene aproximadamente de 50 - 60 cm de altura en dependencia de las características del material.

Para realizar la construcción de un dique se tienen en cuenta las características siguientes:

- Longitud 100 m
- Altura 5 m
- Inclinação de los taludes 2 m por 1 m de altura.
- Ancho de la cresta, 6m

Los volúmenes de material a utilizar se calculan por las ecuaciones siguientes:

$$V_T = (a \cdot h \cdot l) + V_2 \quad (2.1)$$

$$V_2 = 2 \left(\frac{a_2 \cdot h}{2} \cdot l \right) \quad (2.2)$$

Donde:

V_T - volumen total

V_2 - volumen de los taludes

a - ancho de la cresta del dique, (m)

h - altura del dique, (m)

l - longitud del dique, (m)

a_2 - base del talud, (m)

2.5. Metodología de cálculo para determinar las propiedades mecánicas

La metodología de cálculo propuesta ha sido desarrollada por Fourie y Papageorgiou (2001); Chalkley et al. (2002); García (2004); por el Departamento de Agricultura de U.S.A y por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo.

- ✓ Muestreo de un suelo: Consiste en la obtención de una porción del material con el que se pretende construir una estructura o bien del material que ya forma parte de la misma, de tal manera que las características de la porción obtenida sean representativas del conjunto. El muestreo, además, incluye las operaciones de envase, identificación y transporte de las muestras.
- ✓ Densidad in situ por el método de reemplazamiento de agua. Consiste en determinar la densidad del terreno y así verificar los resultados obtenidos en la faena de compactación.

El volumen de la muestra se obtiene con la ecuación siguiente:

$$V_m = V_{m+A} - V_A \quad (2.3)$$

Donde:

V_{m+A} - volumen del hoyo y el anillo; ml

V_A - volumen del anillo; ml

Este método es aplicable en suelos cuyos tamaños de partículas sean menores a 50 mm y el objetivo es obtener el peso del suelo húmedo (P_{hum}) de una pequeña perforación hecha sobre la superficie del terreno y generalmente del espesor de la

capa compactada. Obteniendo el volumen de dicho agujero (V_m) la densidad del suelo estará dada por dicha expresión:

$$\gamma_{hum} = \frac{P_{hum}}{V_m} \cdot 1000 \quad (2.4)$$

Donde:

P_{hum} - peso del suelo húmedo; g

V_m - volumen de la muestra extraída; ml

✓ Contenido de agua en suelo

El contenido de humedad, es la relación del peso del agua entre el peso de los sólidos de un suelo.

Materiales utilizados

Horno eléctrico, que mantenga la temperatura constante a 105 °C.

Balanza con aproximación al 0,1 gr; charola y cápsula de aluminio; espátula; cristal de reloj, el contenido de agua se determina por la ecuación 2.5.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Donde:

ω - contenido de agua de la muestra; %

W_w - peso de la fase líquida de la muestra (peso del agua); g

W_s - peso de la fase sólida de la muestra; g

Para determinar el contenido de humedad por el método rápido se emplea la ecuación 2.6.

$$W = \frac{(T + Sh) - (T + S's)}{(T + S's) - T} \cdot 100 = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Donde:

T - peso de la charola (tara)

Sh - suelo húmedo

$S's$ - suelo seco

Después de determinar el contenido de humedad, se puede tener entonces la densidad seca del material con la expresión 2.7.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (2.7)$$

2.6. Clasificación y propiedades de las partículas del suelo

La composición por tamaño de las partículas (granulométrica) de un suelo, es el porcentaje de materia mineral en peso de cada fracción, obtenida por separación de las partículas minerales en dos más clases por tamaño mutuamente excluyentes.

Las propiedades de las partículas gruesas y finas del suelo difieren considerablemente, pero no hay una división natural marcada de ninguna clase de tamaño de partícula. Sin embargo, para propósitos prácticos se han establecido algunos límites. Comúnmente en los suelos se separan por lo menos tres clases por tamaño usualmente denominados arena, limo y arcilla. El procedimiento usado para medir la composición granulométrica es el análisis granulométrico o mecánico. Los numerosos métodos de análisis están basados en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas del suelo a través del agua aumenta con el diámetro de las mismas, o en una combinación de esta propiedad con el uso de tamices para separar las partículas gruesas.

Se han propuesto varias y diferentes clasificaciones de las fracciones. Citaremos dos de las más importantes, la establecida por el Departamento de Agricultura de U.S.A. y la propuesta últimamente por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo. Se exponen ambas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación de las partículas del suelo

Fracción del suelo	Diámetro límite en mm	Diámetro límite en mm
Arena muy gruesa	2,00 – 1,00	
Arena gruesa	1,00 – 0,50	2,00 – 0,20
Arena media	0,50 – 0,25	
Arena fina	0,25 – 0,10	0,20 – 0,002
Arena muy fina	0,10 – 0,05	
Limos	0,05 – 0,002	0,02 – 0,002
Arcillas	Menos de 0,002	Menos de 0,002

Todas las clasificaciones por tamaño, tienen en común el límite de dos micras (0,002 mm) para la fracción arcilla y difieren fundamentalmente en la subdivisión de la fracción arena.

En la figura 2.3, se presenta la relación en tamaño de las partículas de arena, limo y arcilla.

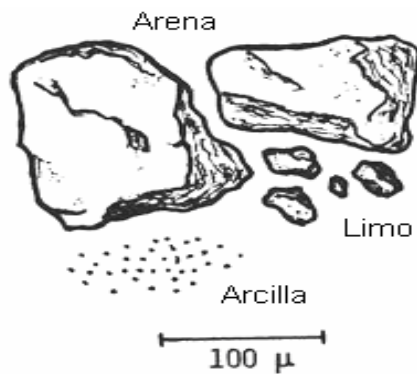


Figura 2.3. Relación en tamaño de partículas de arena, limo y arcilla.

✓ **Análisis granulométrico**

El mismo tiene como objetivo separar por tamaños las partículas de suelos gruesos y finos que componen la muestra de suelo en estudio y en función de lo anterior clasificar el suelo de acuerdo a su graduación:

Ejemplo:

- Grava bien graduada (GW)
- Arena mal graduada (SP)

Se designa como ensayo granulométrico a la determinación de la distribución de las partículas de un suelo en cuanto a su tamaño.

- Aplicación

Al realizar un análisis granulométrico en suelos gruesos, tiene las siguientes aplicaciones:

- a) Poder clasificar los suelos de acuerdo a su graduación.
- b) Analizar el material más factible para la construcción de pavimentos.
- c) Calcular el coeficiente de permeabilidad en una forma aproximada.

Y en suelos finos (partículas que pasan la malla No. 200):

- a) Es conveniente obtener el porcentaje de partículas menores de 0,002 mm, para

definir los porcentajes de limo y arcilla que contiene un suelo, en función de lo anterior podremos definir u obtener la actividad de ese suelo.

Para suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm (74 micrones) se utiliza el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura y numeración indicado en la tabla 2.3. Para suelos de tamaño inferior, se utiliza el método del hidrómetro, basado en la ley de Stokes.

Tabla 2.3. Numeración y abertura de tamices Fuente: Espinace (1979)

Tamiz (ASTM)	Tamiz (Nch) mm	Abertura real (mm)	Tipo de suelo
3"	80	76,12	GRAVA
2"	50	50,80	
1 ½ "	40	38,10	
1"	25	25,40	
¾ "	20	19,05	
3/8"	10	9,52	ARENA GRUESA
Nº 4	5	4,76	ARENA MEDIA
Nº 10	2	2,00	
Nº 20	0,90	0,84	
Nº 40	0,50	0,42	ARENA FINA
Nº 60	0,30	0,25	
Nº 140	0,10	0,105	
Nº 200	0,08	0,074	

Para realizar el método de análisis mecánico se necesitan equipo necesario como son: un juego de tamices normalizados según la tabla anterior; dos balanzas marca sartorius: con capacidades superiores a 20 kg y 2 000 gr, precisiones de 1 y 0,1 gr respectivamente un horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en 110 ± 5 °C; un vibrador mecánico; una bandeja metálica, poruña, recipientes plásticos y escobilla.

Se homogeniza cuidadosamente el total de la muestra en estado natural (desmenuzándola con un mazo) tratando de evitar romper sus partículas individuales, especialmente si se trata de un material blando, piedra arenosa u otro similar se reduce por cuarteo una cantidad de muestra levemente superior a la mínima recomendada según el tamaño máximo de partículas del árido, indicado en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Cantidad mínima a ensayar según tamaño de partículas. Fuente: Geotecnia LNV (1993)

Tamaño máximo de partículas (mm)	Cantidad mínima a ensayar (kg)
5	0,50
25	10,0
50	20,0
80	32,0

De acuerdo a los valores de los pesos retenidos en cada tamiz, se registran los resultados los cuales se determinan por las siguientes ecuaciones:

✓ **Porcentaje retenido en cribas**

$$\%RC = \frac{PRC}{Mt} \cdot 100 \quad (2.8)$$

Donde:

$\% RC$ - porcentaje retenido en cribas; %

PRC - peso retenido en cada criba; gr

Mt - peso total de la muestra seca; gr

✓ **Porcentaje retenido en mallas**

$$\%RM = \frac{PRM \cdot K}{500} \quad (2.9)$$

Donde:

$\% RM$ - porcentaje retenido en mallas; %

PRM - peso retenido en cada malla; gr

K - porcentaje de muestra que pasó el tamiz 3/8"

500 - peso de la muestra representativa; gr

✓ **Porcentaje de pérdida**

Este se determina para cada fracción de material, mediante la siguiente expresión:

$$\% P = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Donde:

- % P - porcentaje de pérdida; %
 M_1 - peso del material (grava o arena) a ensayar; gr
 M_2 - sumatoria de pesos retenidos; gr

✓ Método para análisis hidrométrico

Este método se utiliza para obtener un valor estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran comprendidas entre los 0,074 mm (malla N° 200 ASTM) y hasta alrededor de 0,001 mm. El análisis utiliza la relación entre la velocidad de caída de una esfera en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico de la esfera como del fluido y la viscosidad de este. La velocidad se expresa por medio de la siguiente expresión (Ley de Stokes):

$$V = \frac{(2\gamma_s - \gamma_u) \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{9 \cdot \eta} \quad (2.11)$$

Donde:

- γ_s - peso específico de la esfera; g/cc
 γ_u - peso específico del fluido; g/cc
 η - viscosidad absoluta del fluido; g/cm*seg
 D - diámetro de la esfera; cm

El procedimiento consiste en mezclar una cantidad de suelo (50 g) con agua destilada más 125 ml de un agente dispersante (también denominado agente defloculante), el que neutraliza las cargas eléctricas sobre las partículas más pequeñas del suelo que a menudo tienen carga negativa y se atraen entre sí con fuerza suficiente para permanecer unidos, creando así unidades mayores que funcionan como partículas. Así se obtiene una solución de 1000 cc que se prepara en probetas vickers (ver anexo 5).

A continuación se agita la solución dentro de una mezcladora y se vacía a otra probeta de 1000 cc de capacidad que se encuentre apoyada sobre una base firme, posteriormente se debe accionar el cronómetro, introducir el hidrómetro y el termómetro para determinar los valores.

✓ Límites de consistencia

El mismo se realiza con el objetivo de determinar los límites: líquido, plástico y de contracción por el Método P.R.A. (Public Road Administration), también para obtener la prueba de contracción lineal; esta última tiene aplicación en los estudio de mate riales que se utilizan en las capas del pavimento, lo que no es objetivo del trabajo

El límite líquido y plástico se emplean para clasificar un suelo de acuerdo a su plasticidad.

El límite líquido se define como el contenido de humedad que requiere un suelo para presentar una resistencia al esfuerzo cortante de aproximadamente 25 g/cm^2 , independientemente de su mineralogía.

El límite plástico es la frontera comprendida entre el estado plástico y semi-sólido. Este se define como el contenido de humedad que posee un cilindro de material en estudio de 11 cm de longitud y 3,2 mm de diámetro (formado al girarlo o rolarlo con la palma de la mano sobre una superficie lisa) al presentar agrietamientos en su estructura.

✓ Prueba proctor estándar

Se entiende por compactación la aplicación mecánica de cierta energía, o cantidad de trabajo por unidad de volumen, para lograr una reducción de los espacios entre las partículas sólidas de un suelo, con el objeto de mejorar sus características mecánicas. Para determinar esta propiedad del suelo se realiza la prueba conocida como proctor, la cual consiste en determinar la humedad óptima del material y la densidad seca máxima (Palacio y Jiménez, 2004).

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V} \quad (2.13)$$

Donde:

γ_m - peso volumétrico húmedo; kg /m^3

V - volumen del molde, m^3

W_m - peso del suelo húmedo, kg

El Peso del suelo húmedo se determina entonces por la siguiente ecuación:

$$W_m = (P_m + Sh) - P_m \quad (2.14)$$

Donde:

W_m - peso del molde; kg

Sh - suelo húmedo; %

La ecuación 2.15 entonces permite determinar el peso del agua:

$$W_w = (P_{cáp} + Sh) - P_{cáp} \quad (2.15)$$

Donde:

W_w - peso del agua; kg

$P_{cáp}$ - peso de la cápsula; kg

El contenido de agua permite determinar el grado de compactación del suelo, un contenido del elemento agua mayor que el óptimo disminuye la densidad del suelo y se determina según Warner (2003) como:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (2.16)$$

Donde:

ω - contenido de agua

Y el peso volumétrico seco se determina por la ecuación 2.17.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (2.17)$$

2.7. Caracterización del transporte en la Presa de colas

Para la fabricación de los diques en la Presa de colas de la fábrica "Cmdte Pedro Sotto Alba" se cuenta con diferentes equipos, todo ellos para su automoción emplean petróleo, el mínimo o máximo consumo de combustible depende de las condiciones climáticas, así como del modo de operación de los mismo y la características del terreno en que se operan.

En la tabla 4.5. aparece la relación de equipos automotor denominados carros Volteo, empleados en esta actividad. La denominación según código es:

Tabla 4.5. Consumo de combustible para los equipos pesados.

Índice de consumo del mes de Septiembre									
Equipos	Comb hab.	Horómetro		Cons/horas		kilometraje			
		Inicial	Final	Horas	L/hrs	km _{inic}	km _{fin}	km _{rec}	km/L
CV-1									
CV-2									
CV-3									
CV-4									
CV-5									
CV-6									
CV-7									
CV-8									
CV-9									
CV-10									
CV-11									
CV-12									
CA-1									
CA-003									
Total									

Tabla 4.6. Consumo de combustible para los equipos pesados.

Equipos	Comb hab.	Horómetro		Cons/horas	
		Inicial	Final	Horas	L/hrs
RE-1					
RE-2					
BE-1					
BE-2					
CP-1					
MN-1					
Total					
Total consumido en el mes					

Legenda:

- CV – carro volteo
- RE – retroexcavadora
- CA – carro de agua
- BE – Bulldozer
- CP – Vibrocompactador
- MN – Motoniveladora

- H. inicial – horómetro inicial
- H. final – horómetro final
- L/hrs – litros por horas
- kmInc. – kilómetro inicial
- kmfinal – kilómetro final
- kmrec – kilómetros recorrido
- km/L – kilómetros por litro

2.7.1. Determinación del índice de consumo de combustible

Para determinar el índice de consumo del combustible se procederá por la ecuación 2.18. Este consumo se estimará teniendo en cuenta el horómetro del camión.

$$C_h = hrs \cdot L \quad (2.18)$$

Donde:

C_h - consumo por hora, (L / hrs)

hrs - horas trabajadas, (hrs)

L - litros habilitados, (L)

Entonces el índice de consumo teniendo en cuenta el kilometraje recorrido se determina por la ecuación 2.19.

$$C_{km} = \frac{kmrec}{L} \quad (2.19)$$

Donde:

C_{km} - consumo por kilómetro recorrido

$kmrec$ - kilómetros recorridos, (km)

L - litros habilitados, (L)

Luego se realizará la comparación entre el consumo de combustible por hora en tiempo de seca y lluvia. Lo cual dará el estimado total según las condiciones del terreno,



2.6. Conclusiones del capítulo 2

1. Se establecieron las técnicas experimentales que permitirán dar cumplimiento al desarrollo del trabajo, así como la caracterización de cada uno de los equipos y accesorios.
2. Las ecuaciones desarrolladas permiten determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas del escombro minero para la fabricación de diques en la presa de cola, así como el consumo de combustible en relación a las condiciones del terreno (seco y húmedo)
3. Se estableció la distribución del equipamiento automotor con que se cuenta para la fabricación del dique, así como capacidad de combustible con que se habilita cada transporte.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

La compactación de los suelos se produce por la reorientación o distorsión de las partículas y sus capas absorbidas. En un suelo no cohesivo la compactación ocurre mayormente por la reorientación de los granos para formar una estructura más densa.

El objetivo del capítulo es realizar la valoración de los resultados y el análisis de la metodología de cálculo propuesto para la determinación de las propiedades mecánicas del escombro¹. Así como el análisis de combustible teniendo en cuenta dichas propiedades y las condiciones meteorológicas.

3.2. Análisis de la composición del suelo

La eficiencia y el gasto de combustible de cualquier equipo de compactación dependen de varios factores. Para analizar la influencia particular de cada uno, se requiere de procedimientos estandarizados que reproduzcan en el laboratorio el grado de compactación que se puede lograr en el campo con el equipo disponible. Entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son las más importantes: el contenido de agua del suelo antes de iniciarse el proceso de la compactación y la energía específica empleada en dicho proceso.

En la tabla 3.1 se recoge la composición del suelo objeto de estudio.

Tabla 3.1. Composición del suelo

Yacimiento / Parámetros	U/M	Zona A	Moa Oriental	Camarioca Norte
Peso volumétrico seco in-situ	t/m ³	1,50	1,50	1,24
Peso volumétrico húmedo in-situ	t/m ³	1,91	1,90	1,87
Peso volumétrico húmedo suelto	t/m ³	1,36	1,72	1,21
Humedad	%	21,5	21,0	33,7
Factor esponjamiento		1,40	1,37	1,54

¹Escombro, laterita fuera de balance con bajo contenido de níquel (menor 1 %) y alto contenido de hierro (mayor o igual 45 %). Es un ocre inestructural con o sin perdigones (OICP) o (OISP) El escombro de mejor calidad para relleno y compactación es el OISP.

3.3. Análisis del cálculo para determinar las propiedades mecánicas

Para analizar la compactación del escombro que se empleará para la fabricación del dique de depósito de cola se tuvieron en cuenta algunas propiedades mecánicas de este material, para ello se tomaron 35 muestras, de los últimos tres años, 14 en el año 2009, seis en el 2010 y 15 en el 2011.

Se analizó primeramente la humedad (figura 3.1), estas se obtuvieron con las ecuaciones 2.2 y 2.3 y se determinaron los resultados siguientes.

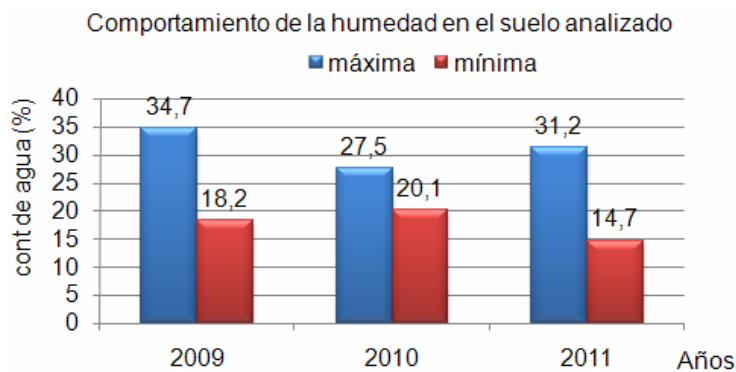


Figura 3.1. Comportamiento de la humedad.

Para tener los valores más significativos posibles se determinaron en los tres años el contenido de humedad mínimo y máximo del material que se estudia, en condiciones y zonas diferentes. De esta forma tenemos como se muestra en la figura 3.1, que en el 2009 el valor mínimo de humedad obtenido fue de un 18,2 % y el máximo de un 34,7 %, provocado esto por las afectaciones de las lluvias que en ese año fue considerable.

En el 2010 el valor mínimo de humedad fue de 20,1 % y el máximo de 27,5 %, este año no fue tan lluvioso como el 2009 pero el material se extrajo de una zona baja por lo que el valor mínimo de humedad se ve afectado por el estado *quasi-saturado* del suelo.

En el año 2011 el contenido de humedad mínimo fue de 14,7 % y el máximo de 31,2 %, este año fue el menos lluvioso de los tres pero se mantuvo extrayendo el material de la zona más baja aunque ya el nivel de saturación del manto freático estaba mas bajo que en el 2010.

Se determinaron los promedios de humedad por cada año (figura 3.2)

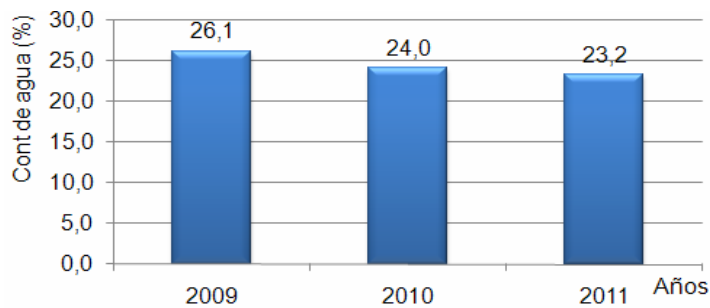


Figura 3.2. Promedio de humedad.

Se analizó el promedio de humedad por años, como se muestra en la figura 3.2 y estos se comportaron de la siguiente manera, para el año 2009 fue de 26,1 %, en el año 2010 de 24,0 % y para el año 2011 de un 23,2 %. Obteniéndose una humedad promedio del material que se analiza de 24,5 %.

La humedad del material es un factor influyente en el consumo de combustible y en la calidad de los diques que se construyen, mientras más humedad tenga el material al transportarlo se hace más pesado, más se adhiere a las cama de los camiones y se necesita mayor energía para obtener la compactación deseada, esto trae consigo que los equipos tengan que realizar mayor esfuerzo y el gasto de combustible aumente, por lo que se hace necesario utilizar el material con una humedad real en un rango de ($\pm 2 a 5 \%$) de diferencia de la humedad óptima con el fin de garantizar una mayor eficiencia y mejor compactación.

El comportamiento de la humedad óptima, aparece en la figura 3.2.

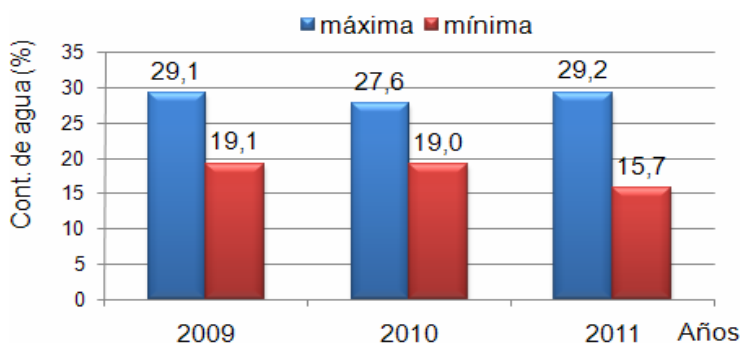


Figura 3.2. Comportamiento de la humedad óptima.

Como se muestra en la figura 3.2 la humedad óptima mínima y máxima tiene un comportamiento poco variable en cada año. En el 2009 la humedad óptima mínima fue de 19,9 % y la máxima de 29,1 %. Para el año 2010 la humedad óptima mínima fue 19,0 % y la máxima 27,6 % y en el 2011 la mínima fue de 15,7 % y la máxima de 29,2 %.

La figura 3.3 muestra el comportamiento de la humedad óptima promedio.

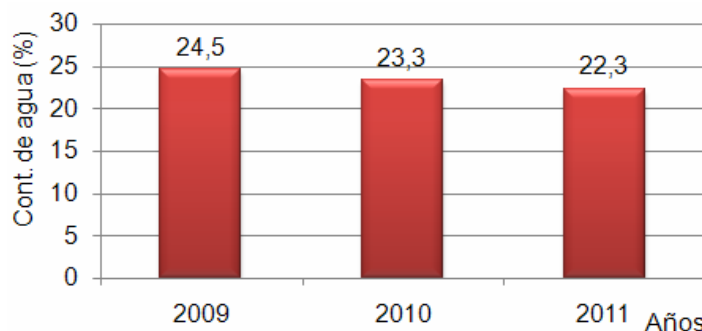


Figura 3.3. Comportamiento del promedio de humedad óptima.

De la figura 3.3 obtenemos que para el 2009 la humedad óptima fue de 24,5 %, para el 2010 de 23,3 % y para el 2011 de 22,3 %. Esto da como resultado que la humedad óptima del material que se analiza sea 23,3 %. Es decir con esta humedad el material alcanzará la máxima densidad seca y el mayor grado de compactación. Si comparamos la humedad real que posee el material con su humedad óptima tenemos lo que se muestra en la figura 3.4.

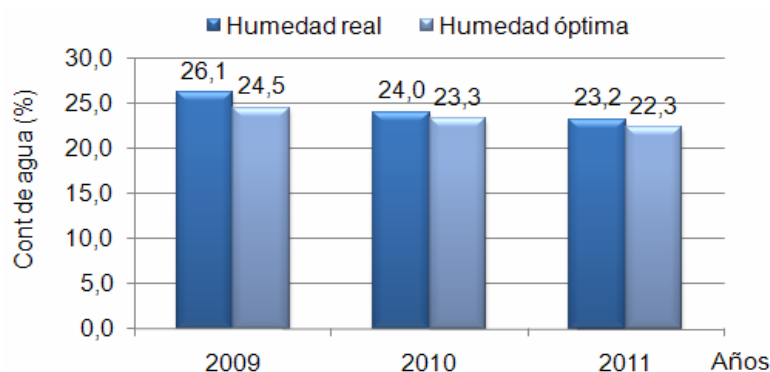


Figura 3.4. Comparación de la humedad real con la humedad óptima.

Al analizar la figura 3.4 podemos plantear que el material en lo que respecta a humedad puede utilizarse en el levantamiento de diques para la contención de las colas, ya que la humedad real está de 1 a 2 % por encima de la humedad óptima y

esto es bastante favorable, teniendo en cuenta que en las operaciones de carga y transportación, el material pierde humedad, y cuando se proceda su compactación su humedad real será bastante aproximada a su humedad óptima lográndose una mayor densidad seca del material que a la vez tendrá una mayor compactación con menos pasadas del vibrocompactador y lograríamos un ahorro de combustible.

Para determinar la densidad seca del mineral, se consideraron de igual forma los años 2009; 2010 y 2011, obteniéndose un valor mínimo y máximo para cada año, los resultados se muestran en la figura 3.5.

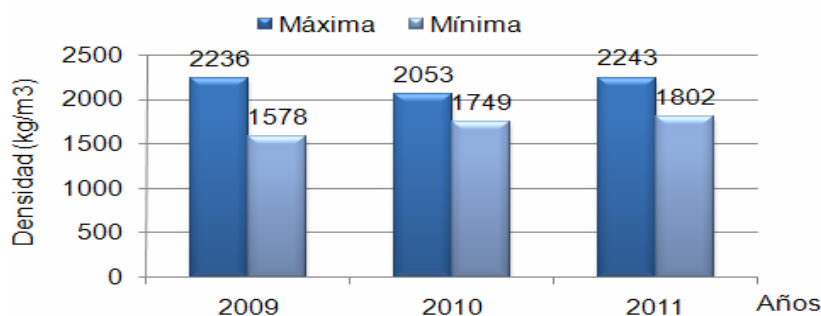


Figura 3.5. Comportamiento de la densidad seca.

Determinado el contenido de humedad, nos permitió obtener la densidad seca, (ecuación 2.5), lo que a su vez posibilitó establecer otra de las características requeridas para que el terreno pueda alcanzar una mejor compactación. Como se muestra en la figura 3.5 en el año 2009 la máxima densidad seca fue de 2 236 kg/m³ y la mínima de 1578 kg/m³, para el año 2010 la máxima densidad seca fue de 2 053 kg/m³ y la mínima de 1 749 kg/m³. Al evaluar la máxima densidad seca en el año 2011 fue de 2243 kg/m³ y la mínima de 1802 kg/m³. Para tener con claridad la densidad seca del material que se estudia sacamos un promedio en cada año analizado, como aparece en la figura 3.6.

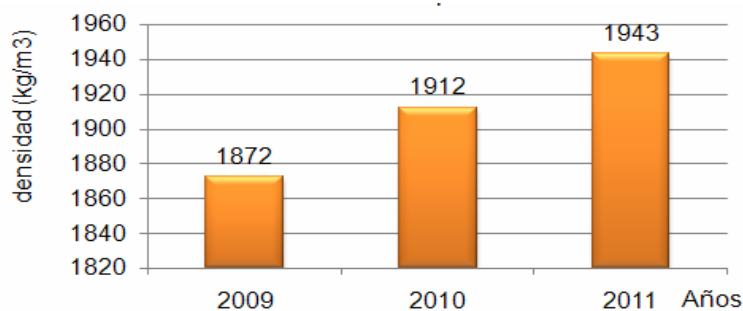


Figura 3.6. Comportamiento de la densidad seca promedio.

La densidad promedio en el año 2009 fue de 1 872 kg/m³, para el 2010 de 1912 kg/m³ y para el año 2011 de 1 947 kg/m³ esto nos dice que la densidad seca promedio del material que se analiza es de 1 856 kg/m³.

La densidad seca máxima, es la que alcanza el material cuando es sometido a un proceso de compactación y la humedad real del mismo es igual a su humedad óptima, para su análisis tomamos los valores mínimo y máximo obtenidos en los años 2009, 2010 y 2011.

En el 2009 el material analizado alcanzó una densidad máxima entre 1 655 y 1 998 kg/m³, para el 2010 alcanzó entre 1 710 y 1 990 kg/m³ y En el 2011 entre 1 710 y 2 160 kg/m³ las mismas fueron determinadas en el laboratorio. La densidad seca máxima promedio del 2009 fue de 1831 kg/m³ para una humedad óptima de 24,5 %

La densidad seca máxima promedio del 2010 fue de 1 856 kg/m³ para una humedad óptima de 23,3 %. La densidad seca máxima promedio del 2011 fue 1 879 kg/m³ para una humedad óptima de 22,3 %

Esto demuestra que este material que se estudia puede alcanzar un promedio de densidad máxima de 1 856 kg/m³ con una humedad óptima de 23,3 %.

La granulometría se determinó teniendo en cuenta los elementos fundamentales que se encuentran en el terreno. Este comportamiento aparece en la figura 3.7.

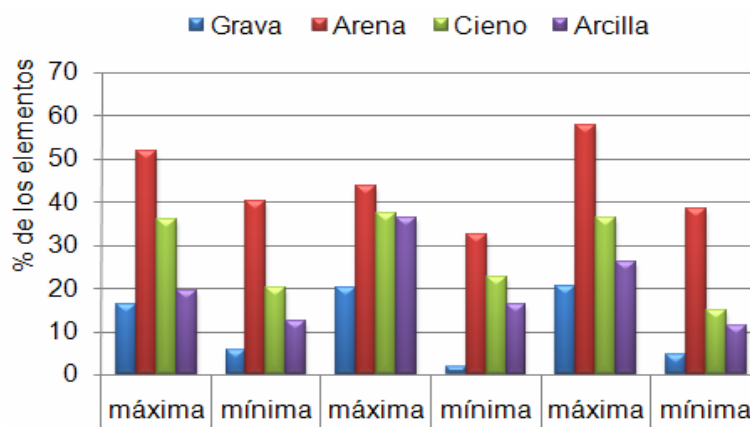


Figura 3.7. Comportamiento de la granulometría.

Como se muestra en la figura anterior el suelo que se estudia tiene una granulometría bastante aceptable donde predominan la arena y el cieno

respectivamente y encontrándose también pero en menor porcentaje la arcilla y un escaso porcentaje de grava lo cual permitirá al material alcanzar una buena compactación y ahorro considerable de combustible.

La granulometría promedio aparece en la figura 3.8.

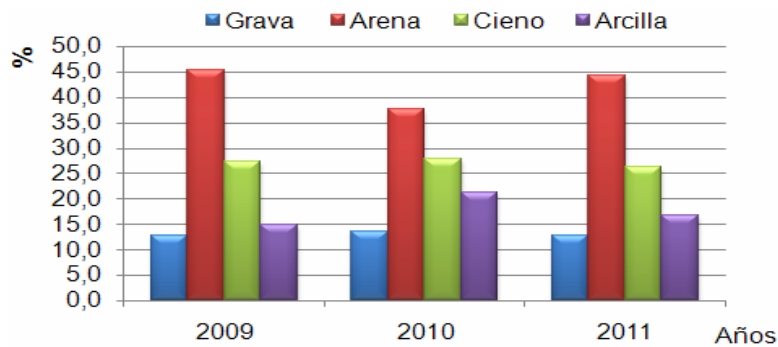


Figura 3.8. Granulometría promedio.

El material analizado tiene una granulometría promedio que se comporta de la siguiente forma, la grava con un 12,0 %; la arena con un 43,5 %; el cieno con un 26,9 % y la arcilla con un 16,7 %.

Los resultados de los ensayos mecánicos, revelan deformaciones de colapso mayores a las de hinchamiento al incrementar el grado de saturación. Este comportamiento indica la presencia de partículas de arena y de cieno predominantemente. La arcilla por su parte permite que al compactar el suelo se comporte más impermeable.

Si los granos se pueden liberar momentáneamente, las presiones, aún las ligeras, son efectivas para forzarlos a formar una distribución más compacta. El agua que fluye también reduce el rozamiento entre las partículas y hace más fácil la compactación.

Al tener mayor facilidad de compactación, conllevaría a un ahorro considerable de combustible, la transportación de mineral y el trabajo del vibrocompactador solamente estarían determinados a menores números de viajes y a menores números de pasadas.

Por las ecuaciones 2.10 y 2.11 se determinaron los límites (Líquido, Plástico e Índice de plasticidad). En la figura 3.9 aparece el comportamiento de los mismos.

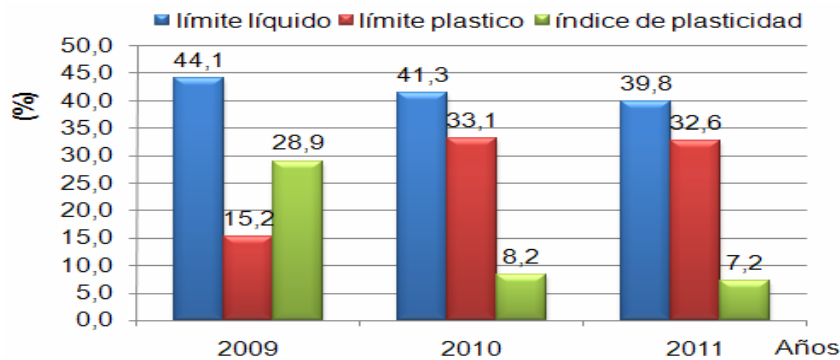


Figura 3.9. Promedio de los límites líquido, plástico y el índice de plasticidad.

Para determinar el límite plástico, se procedió a obtener el contenido de agua correspondiente a los años 2009, 2010 y 2011, estos dos contenidos de agua se promediaron para dos puntos porcentuales.

3.2.1. Análisis del proctor estándar

A partir de la muestra total de residuos previo secados y amasados con diferentes humedades, se ha efectuado un ensayo de compactación del tipo Proctor estándar, según norma NLT-107/76, lo cual se muestra en la figura 3.10.

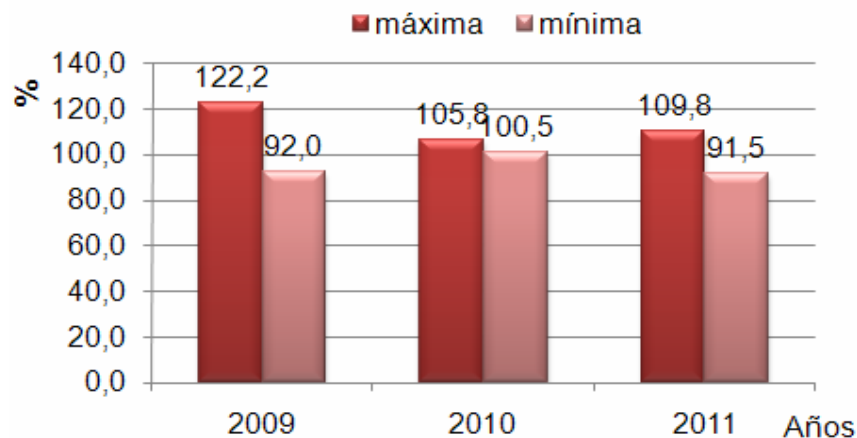


Figura 3.10. Comportamiento de la compactación.

Para determinar el comportamiento de la compactación (figura 3.10), se analizaron los años 2009, 2010 y 2011.

Luego de determinado el comportamiento de la compactación, se procedió a realizar el análisis de la compactación promedio (figura 3.11) prueba que permitirá evaluar la calidad final del terreno para la construcción del dique, además permite evaluar también como se comporta el consumo de combustible.

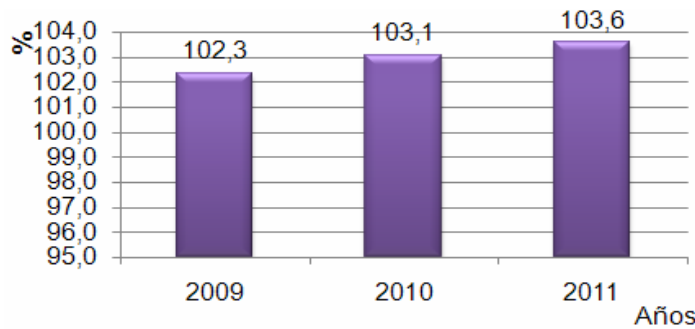


Figura 3.11. Comportamiento de la compactación promedio.

La compactación del terreno, luego de analizado los diferentes años, se puede apreciar que para el 2011, con un tiempo promedio menor de agua que los años anteriores, se logró una compactación de 103,0 %, demostrándose con dicha cifra que logrando controlar la humedad en el material que se utiliza para la fabricación de diques se logrará una buena compactación y se ahorrará una cantidad de combustible considerable.

3.4. Análisis del consumo de combustible para tiempo de seca

Para establecer el comportamiento del combustible para tiempo de seca se escogieron los tres meses en el año más significativos (junio, julio y agosto), los cuales han sido separados según la clasificación de los equipos. En las tablas 3.2; 3.3; 3.4; 3.5; 3.6 y 3.7 aparecen los diferentes consumos.

Tabla 3.2. Consumo de combustible en el mes de junio para los carros volteos

Índice de consumo del mes de junio									
Equipos	comb hab	horómetro		Cons/horas		kilometraje			
		Inicial	Final	Horas	L/hrs	km _{inic}	km _{fin}	km _{rec}	km/L
CV-1	1361	6076	6222	146	9,3	94517	96423	1906	1,4
CV-2	1846	5671	5862	191	9,7	95591	99752	4161	2,25
CV-3	1251	6077	6207	130	9,6	93600	96053	2453	1,96
CV-4	1481	6563	6707	144	10,3	107337	109282	1945	1,31
CV-5	880	6208	6331	123	7,2	93729	94780	1051	1,19
CV-6	1757	6291	6431	140	12,6	78625	82109	3484	1,98
CV-7	1379	5546	5723	177	7,8	97843	99989	2146	1,56
CV-8	1346	5766	5887	121	11,1	83772	86202	2430	1,81
CV-9	640	6074	6132	58	11	98235	99452	1217	1,9
CV-10	1709	6287	6410	123	13,9	95948	97951	2003	1,17
CV-11	903	5644	5776	132	6,8	75280	76219	939	1,04
CV-12	1250	5251	5417	166	7,5	83903	85752	1849	1,48
CA-1	929	6277	6421	144	6,45	4962	6197	1235	1,33
CA-003	1299	367	493	126	10,31	5123	7197	2074	1,6
Total	18 031 L								

Tabla 3.3. Consumo de combustible en el mes de junio para los equipos pesados

Equipos	comb hab	horómetro		Cons/horas	
		Inicial	Final	Horas	L/hrs
RE-1	3730	5776	5923	147	25,4
RE-2	2841	5304	5425	121	23,5
BE-1	2426	4789	4886	97	25
BE-2	3143	5030	5173	143	22
CP-1	1299	3537	3609	72	18
MN-1	1747	5396	5518	122	14,3
Total	15 186				
Total consumido en el mes 33 217 L					

Tabla 3.4. Índice de consumo del mes de julio para los carros volteos

Índice de consumo de Julio									
Equipos	comb hab	horómetro		Cons/horas		kilometraje			
		Inicial	Final	Horas	L/hrs	km _{inic.}	km _{final}	km _{rec}	km/L
CV-1	1352	7335	7468	133	10,2	114085	116309	2224	1,64
CV-2	1576	5671	5828	157	10	95591	97859	2268	1,44
CV-3	1600	7340	7465	125	12,8	115107	118515	3408	2,13
CV-4	1303	7459	7587	128	10,2	112089	114172	2083	1,6
CV-5	717	7525	7635	110	6,5	93053	93897	844	1,18
CV-6	1648	6950	7095	145	11,4	121403	123785	2382	1,45
CV-7	725	6875	6984	109	6,7	103660	104856	1196	1,65
CV-8	1530	7435	7577	142	10,8	120851	123391	2540	1,66
CV-9	1428	7462	7576	114	12,5	116950	119121	2171	1,52
CV-10	657	6659	6778	119	5,5	85167	86063	896	1,36
CV-11	1406	6832	6973	141	10	111145	113745	2600	1,85
CV-12	1182	1845	1971	126	9,4	27489	29565	2076	1,76
CA-1	810	7281	7424	143	5,66	74024	75068	1044	1,29
CA-003	678	430	528	98	6,92	9362	10699	1337	1,97
Total	16 612 L								

Tabla 3.5. Consumo de combustible en el mes de julio para los equipos pesados

Equipos	comb hab	horómetro		Cons/horas	
		Inicial	Final	Horas	L/hrs
LRE-1	2890	7151	7281	130	22,2
LRE-2	2560	6261	6398	137	18,7
LBE-1	2870	5679	5791	112	25,6
LBE-2	2940	6448	6567	119	24,7
LCP-1	1300	4528	4617	89	14,6
LMN-1	1248	6603	6692	89	14
Total	13 808				
Total consumido en el mes 30 420 L					

Tabla 3.6. Índice de consumo del mes de agosto para los carros volteos

Índice de consumo de Agosto									
Equipos	comb hab	horómetro		Cons/horas		kilometraje		km _{rec}	km _{/L}
		Inicial	Final	horas	L/hrs	km _{inic}	km _{fin}		
CV-1	1080	7214	7335	121	8,9	111966	114085	2119	1,96
CV-2	1300	6827	6940	113	11,5	116500	118731	2231	1,72
CV-3	1110	7239	7340	101	11	112703	115107	2404	2,17
CV-4	250	7418	7459	41	6,1	111477	112089	612	2,45
CV-5	955	7413	7525	112	8,5	91870	93053	1183	1,24
CV-6	1030	6844	6950	106	9,7	119377	121403	2026	1,97
CV-7	1135	6756	6875	119	9,5	101715	103660	1945	1,71
CV-8	1210	7303	7435	132	9,2	118392	120851	2459	2,03
CV-9	1140	7367	7462	95	12	115130	116950	1820	1,6
CV-10	580	6566	6659	93	6,2	84354	85167	813	1,4
CV-11	1050	6702	6832	130	8,1	108818	111145	2327	2,22
CV-12	960	1717	1845	128	7,5	25477	27489	2012	2,1
CA-1	690	7206	7281	75	9,2	73150	74024	874	1,27
CA-003	380	382	430	48	7,92	8860	9362	502	1,32
Total	12 870 L								

Tabla 3.7. Consumo de combustible en el mes de agosto para los equipos pesados

Equipos	Comb Hab	Horómetro		Cons/horas	
		Inicial	Final	Horas	L/hrs
LRE-1	2760	7022	7151	129	21,4
LRE-2	1935	6173	6261	88	22
LBE-1	2410	5576	5679	103	23,4
LBE-2	2650	6316	6448	132	20,1
LCP-1	1030	4447	4528	81	12,7
LMN-1	1860	6488	6603	115	16,2
Total	12 645				
Total consumido en el mes 25 515 L					

Al realizar el análisis de los meses de seca se pudo determinar los siguientes consumos.

- Mes de junio: 33 217 litros habilitado y 2 623 horas trabajadas.
- Mes de julio: 30 420 litros habilitado y 2 134 horas trabajadas.
- Mes de agosto: 25 515 litros habilitado y 2 466 horas trabajadas.

3.4.1. Consumo de los meses con afectaciones de lluvia

Los meses con mayores afectaciones de lluvia son: septiembre, abril y mayo. El índice del consumo de combustible se recoge en las tablas 3.8; 3.9; 3.10; 3.11; 3.12 y 3.13, se procedió de igual manera que cuando se realizó el análisis para tiempo de seca.

Tabla 3.8. Índice de consumo del mes de septiembre para los carros volteos

Índice de consumo del mes de Septiembre									
		horómetro		Cons/horas		kilometraje			
Equipos	comb hab	Inicial	Final	Horas	L/hrs	km _{inic}	km _{fin}	km _{rec}	km/L
CV-1	1361	7468	7590	122	11,2	116309	118412	2103	1,55
CV-2	1576	5828	5934	106	14,9	97859	100071	2212	1,4
CV-3	1846	7465	7592	127	14,5	118515	120729	2214	1,2
CV-4	1251	7587	7693	106	11,8	114172	116281	2109	1,69
CV-5	1481	7635	7737	102	14,5	93897	96108	2211	1,49
CV-6	880	7095	7201	106	8,3	123785	125886	2101	2,39
CV-7	1757	6984	7096	112	15,7	104856	106954	2098	1,19
CV-8	290	7577	7608	31	9,4	123391	123969	578	1,99
CV-9	1379	7576	7701	125	11	119121	121331	2210	1,6
CV-10	1346	6778	6909	131	10,3	86063	88276	2213	1,64
CV-11	640	6973	7024	51	12,5	113745	114507	762	1,19
CV-12	1709	1971	2122	151	11,3	29565	31695	2130	1,25
CA-1	903	7424	7496	72	12,54	75068	76066	998	1,11
CA-003	929	528	603	75	12,39	10699	11655	956	1,03
Total	17 348 L								

Tabla 3.9. Consumo de combustible en el mes de septiembre para los equipos pesados

		horómetro		Cons/horas	
Equipos	comb hab	Inicial	Final	Horas	L/hrs
RE-1	3730	7281	7437	156	23,9
RE-2	2841	6398	6540	142	20
BE-1	2426	5791	5893	102	23,8
BE-2	3143	6567	6690	123	25,6
CP-1	1299	4617	4710	93	14
MN-1	1747	6692	6802	110	15,9
Total	15186				
Total consumido en el mes 32 534 L					

Tabla 3.10. Índice de consumo del mes de abril

Índice de consumo de abril									
		horómetro		Cons/horas		kilometraje			
Equipos	comb hab	Inicial	Final	horas	L/hrs	km _{inic}	km _{fin}	km _{rec}	km/L
CV-1	970	5804	5916	112	8,7	90654	92032	1378	1,42
CV-2	2031	5341	5503	162	12,5	89776	92831	3055	1,5
CV-3	1641	5772	5898	126	13	88894	91131	2237	1,36
CV-4	1487	6270	6397	127	11,7	102820	104870	2050	1,38
CV-5	1776	5930	6063	133	13,4	88845	91341	2496	1,41
CV-6	1385	5950	6108	158	8,8	75295	76974	1679	1,21
CV-7	1422	5260	5388	128	11,1	93970	95972	2002	1,41
CV-8	1299	5524	5662	138	9,4	80239	82356	2117	1,63
CV-9	1551	5714	5888	174	8,9	93084	95646	2562	1,65
CV-10	1533	6027	6168	141	10,9	91514	93933	2419	1,58
CV-11	991	5401	5520	119	8,3	72759	74249	1490	1,5
CV-12	1252	4934	5074	140	8,9	78944	81104	2160	1,73
CA-1	840	5945	6094	149	5,64	1425	2950	1525	1,82
CA-003	1130	58	200	142	7,96	1025	2350	1325	1,17
Total	19 308 L								

Tabla 3.11. Consumo de combustible en el mes de abril para los equipos pesados

Equipos	comb hab	horómetro		Cons/horas	
		Inicial	Final	Horas	L/hrs
LRE-1	3834	5431	5579	148	25,9
LRE-2	2497	5012	5135	123	20,3
LBE-1	2770	4530	4650	120	23,1
LBE-2	2438	4718	4842	124	19,7
LCP-1	1953	3300	3410	110	17,8
LMN-1	1976	5097	5234	137	14,4
Total	15 468				
Total consumido en el mes 34 776 L					

Tabla 3.12. Índice de consumo del mes de mayo

Índice de consumo de mayo									
Equipos	comb hab	Horómetro		Cons/horas		kilometraje			
		Inicial	Final	horas	L/hrs	km _{inic}	km _{fin}	km _{rec}	km/L
CV-1	1477	5916	6076	160	9,2	92032	94517	2485	1,68
CV-2	1664	5503	5671	168	9,9	92831	95591	2760	1,66
CV-3	1828	5898	6077	179	10,2	91131	93600	2469	1,35
CV-4	1734	6397	6563	166	10,4	104870	107337	2467	1,42
CV-5	1629	6063	6208	145	11,2	91341	93729	2388	1,47
CV-6	1332	6108	6291	183	7,3	76974	78625	1651	1,24
CV-7	1583	5388	5546	158	10	95972	97843	1871	1,18
CV-8	1132	5662	5766	104	10,9	82356	83772	1416	1,25
CV-9	1680	5888	6074	186	9	95646	98235	2589	1,54
CV-10	1277	6168	6287	119	10,7	93933	95948	2015	1,58
CV-11	955	5520	5644	124	7,7	74249	75280	1031	1,08
CV-12	1710	5074	5251	177	9,7	81104	83903	2799	1,64
CA-1	1423	6094	6277	183	7,78	2950	4962	2012	1,41
CA-003	1472	200	367	167	8,81	2350	5123	2773	1,88
Total	20 896 L								

Tabla 3.13. Consumo de combustible en el mes de mayo para los equipos pesados

Equipos	comb hab	horómetro		Cons/horas	
		Inicial	Final	Horas	L/hrs
LRE-1	5368	5579	5776	197	27,2
LRE-2	3941	5135	5304	169	23,3
LBE-1	3489	4650	4789	139	25,1
LBE-2	4072	4842	5030	188	21,7
LCP-1	1946	3410	3537	127	15,3
LMN-1	2058	5234	5396	162	12,7
Total	20 874				
Total consumido en el mes 41 770 L					

Al realizar el análisis de los meses de lluvia se pudo determinar los siguientes consumos.

- Mes de septiembre: 32 534 litros habilitado y 2 143 horas trabajadas.
- Mes de abril: 34 776 litros habilitado y 2 711 horas trabajadas.

- Mes de mayo: 41 770 litros habilitado y 3201 horas trabajadas.

Al evaluar el mayor consumo en los meses de seca, que le corresponde al mes de junio con 33 217 litros habilitados y el mayor consumo para los meses de lluvia, al mes de mayo con 41 770 litros habilitados, se tiene una diferencia de 8 553 litros menos que se habilitaron, los resultados se corresponden con las pruebas de laboratorio realizadas, demostrándose que en período de seca existe un menor consumo de combustible en la realización de los diques de rechazo minero. Lo anterior planteado se refleja en la figura 3.12.

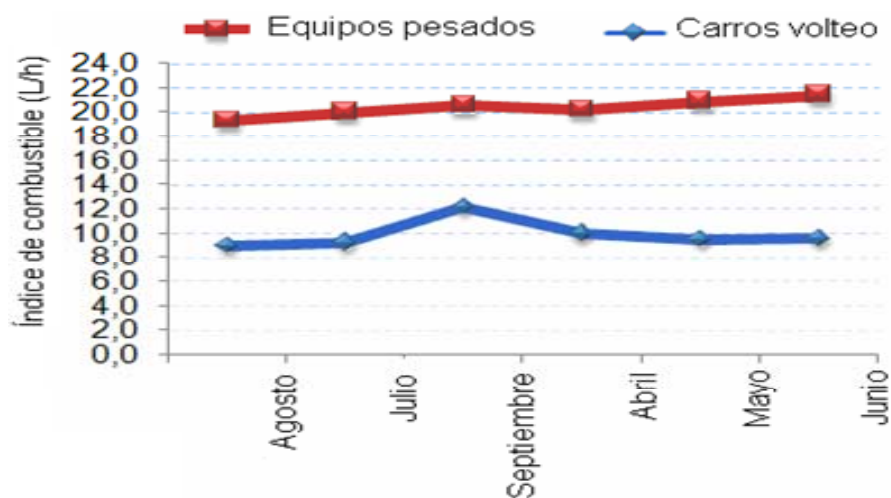


Figura 3.12. Consumo de combustible de los carros volteo y equipos pesados.

En la figura 3.12 se refleja el consumo de los carros volteo y equipos pesados, se puede apreciar un incremento superior en el consumo de los equipos pesados, donde se reporta un consumo entre 18,5 a 22 L/hrs, mientras que el consumo de los carros volteos está entre 8 y 10 L/hrs, notándose un ligero incremento para el mes de agosto, lo cual puede estar motivado por la ocurrencia de lluvias.

3.5. Valoración económica

Uno de los parámetros fundamentales que indica la efectividad de cualquier operación en una empresa lo es la eficiencia con se realice el trabajo, por lo que se hace necesario emplear correctamente los recursos que se ponen a disposición de los proyectos.

Al abordar el aspecto económico considerando la disponibilidad del equipamiento que se utiliza en el levantamiento de los dique de la presa de colas de la fábrica Pedro Sotto Alba, se tuvo en cuenta las incidencias económicas que generan los mismos al no explotarse de la forma correcta, la alteración de los índices de consumo de combustible, y las repentinas paradas por averías si se utilizan bajos condiciones ambientales anormales.

En la tabla 3.14 se muestra el análisis del gasto de combustible.

	Meses de seca	Meses de lluvia
Total combustible utilizado (L)	89 152 L	109 080 L
Total costo del combustible (CUC)	88 260,5 CUC	107 989 CUC
Un litro de diesel tecnológico cuesta 0,99 CUC		

Al analizar la tabla 3.14 se puede apreciar que en los meses de lluvia se habilitaron 19 928 L más que en los meses de seca, lo que significa un ahorro de 19 728 CUC.

Para la construcción del dique contamos con:

Equipos	Índice Consumo (L/hrs)	
	Meses de seca	Meses de lluvia
12 camiones volteos	9,2	10,5
2 camiones pipas	9,2	10,5
2 retroexcavadoras	22,2	23,4
2 buldózer	23,4	23,1
1 compactador	15,1	15,7
1 motoniveladora	14,8	14,3

Capacidad de carga de los camiones, 10 m^3

Volumen necesario para la construcción de 100 m de dique, $5 300 \text{ m}^3$ (según ecuación 2.1 y 2.2),

3.6. Impacto medio ambiental

La presa de cola de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba” es una de las presas con mejor desempeño ambiental del grupo empresarial Cuba Níquel, donde se invierten millones de dólares anualmente para garantizar el factor de seguridad de la misma, lográndose esto a través del cumplimiento de las normas de construcción, operación y mantenimiento, tanto nacionales como internacionales. A pesar de ello existen problemas que indican que esta obra es vulnerable ante la creciente actividad sísmica.

Durante su construcción y funcionamiento se presentan problemas de deslizamientos, estos tienen normalmente su origen en una rotura local, ocasionándose posteriormente una rotura general causada por la propagación de la primera, que se producen cuando una gran masa de terreno inestable se mueve sobre el material firme o zona estable que tiene por debajo.

Frecuentemente las fallas de presas de relaves se han manifestado como una inestabilidad o deslizamiento de talud exterior. El estudio de casos históricos permite identificar los principales mecanismos que causan las fallas de las presas de residuales mineros; los más frecuentes son:

- Deslizamiento de talud.
- Sobrepaso, erosión del dique, tubificación.
- Falla por problemas en las estructuras auxiliares.
- Problemas de fundación.
- Terremotos (Sismos).

Las empresas mineras enfrentan hoy el legado de una explotación irracional de los recursos, obras que constituyen riesgos para las Comunidades y el medio ambiente en general. La explotación de los recursos minerales dentro de la industria cubana del níquel posee varias décadas de trabajo, durante los cuales se han provocado daños importantes al medio ambiente dentro de los cuales se destacan la formación de varios depósitos de colas, encontrándose dos de ellos abandonados, el resto están en la fase final de sus operaciones.

Estas presas de colas se caracterizan por presentar un alto grado de impacto visual y de contaminación de las áreas de influencias, tanto terrestres como marítimas, se consideran obras de alto riesgo debido a que están construidas sin tener presente las medidas de prevención y corrección necesarias para mitigar los posibles daños a provocarse por la acción de fenómenos naturales o antrópicos.

3.6.1. Afectaciones en las condiciones ambientales

Para el impacto ambiental que temáticamente se trata de aplicar a la investigación se tomaran en cuenta tres factores principales desde el punto de vista ambiental como son los suelos, morfología e hidrogeología, destacándose que para este proyecto el impacto es mayor por que se trata de levantamientos de diques en la presa de cola y que trae consigo las siguientes afectaciones;

- Contaminación de las aguas superficiales por el arrastre de sedimentos hacia los ríos.
- Contaminación de las aguas subterráneas a partir de infiltración de la presa de cola.
- Contaminación por el polvo levantado por los equipos durante la confección de los diques.
- Emanaciones de gases de combustión interna de los vehículos que trabajan en el levantamiento de diques.
- Desviación del río de Cabaña, lo cual trae como consecuencia que en los períodos de lluvias este provoque la pérdida de materiales en el talud que compone la parte sur oeste de la presa.
- Deslaves o reboses de la presa de colas producto a las intensas lluvias.
- Debido a la mala compactación existentes en los diques se produce la licuefacción de los residuos.
- Manifestaciones de erosión de tres tipos: laminar en surcos y en forma de cárcavas.
- Destrucción de la flora y fauna.



3.7. Conclusiones del capítulo 3

- ✓ La metodología de cálculo propuesta permite establecer el comportamiento del suelo para establecer el diseño de la presa a partir del escombro minero, además establecer el comportamiento del uso del combustible al realizar esta actividad.
- ✓ Quedó establecido el comportamiento del consumo de combustible según la disponibilidad de equipos que se requieren para la construcción del dique de escombro minero.
- ✓ La energía que se aplica al suelo durante el proceso de compactación tiende a reducir su volumen y a deformarlo angularmente, pero esta compactación depende de las características del escombro para la reducción del consumo de combustible.



Conclusiones Generales

- Se determinó a través de los ensayos de laboratorio que la composición del escombro minero empleado en la fabricación de dique el cual está compuesto por un 16,1 % de gravilla, un 51,6 % de arena, un 11,8 % de cieno y un 20,4 % de arcilla, lo cual lo hace susceptible a la humedad y resbaladizo en tiempo de lluvia.
- Al establecer el consumo de combustible de los equipos automotores, se pudo determinar que en los meses de lluvia existe un consumo de 109 080 L de combustible y en los meses de seca de 89 152 L lo cual está motivado por la característica del terreno y las de el material que trasladan.
- Al efectuar el análisis económico se pudo determinar que durante los meses de lluvia existe mayor consumo de combustible ascendiendo este a 19 728 CUC en comparación con los meses de seca.
- De la evaluación de impacto ambiental se pudo demostrar que los componentes ambientales más afectados en la etapa de levantamiento de diques son los componentes, aire, suelo y el recurso biótico,



Recomendaciones

- Prever y realizar la vigilancia de la construcción de la presa para verificar la conformidad con el diseño, así como llevar a cabo la revisión periódica de las características de diseño a medida que avanza la obra.
- Establecer control periódico a los equipos que laboran bajo régimen de polvos, los cuales afectan grandemente los componentes mecánicos de los equipos que pueden incidir en bajos rendimientos y altos consumos.
- Mantener un control estricto mediante las pruebas de laboratorio para que las características del escombro a utilizar en la construcción de los diques sean las más adecuadas.
- Proponer a la dirección de la Mina, que en caso de que sea necesario laborar en condiciones de lluvias, controlar el escombro que se adhiere en los volteos (carga viajera) lo cual provoca que aumente el índice de consumo de combustible de los camiones.

Referencias bibliográficas



Bibliografía

1. Abdrabbo, F.; El Hansy, R.; y Hamed, K., Collapsibility on Egyptian loess soil. In H. Rahardjo, D.G. Toll and E.C. Leong (eds.) Proc. Of the Asian Conf. on Unsaturated Soils, Singapore, Rotterdam, Balkema: 595-600. 2000.
2. Adams, B.; Wulfsohn, D., y Fredlund, D., Air volume change measurement in unsaturated soil testing using a digital pressure-volume controller. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 19(1): 12-21. 1996.
3. Alonso, E.; Gens, A.; Hight, D., Special problem soils. General report. In proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 3: 1087-1146. 1987.
4. Alonso, E., Gens, A., Aznalcóllar dam failure. Part 1: Field observations and material properties. Géotechnique 56, No. 3, 165–183. 2006.
5. Anderson, W.; Goodwin, A.; Pyrah, I., y Salman, T., Equipment for one-dimensional compression and triaxial testing of unsaturated granular soils at low stress levels. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 20 (1): 74-89. 1997.
6. Armijo, P., Influencia de los métodos de mejora del terreno en la resistencia de suelos flojos frente a terremotos. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 1995.
7. Barrera, M.; Lloret, A., Vaunat, J.; y Gens, A., Análisis teórico y experimental del efecto de la carga de compactación en los cambios de volumen de un suelo. XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos en Ingeniería Geotécnica, COBRAMSEG, Brasilia Vol. 3: 835-842. 1998.
8. Barrera, M.; Romero, E.; Lloret, A., y Vaunat, J., Hydro-mechanical behaviour of a clayey silt during controlled-suction shearing. International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, A. A. Balkema, Rotterdam Vol. 2: 485-490. 2002.
9. Been, K., y Sills, G., Self-weight Consolidation of Soft Soils: an Experimental and Theoretical Study Geotechnique 31, W 4, pp. 519-535 1981.
10. Bligh, G., Destructive mudflows as a consequence of tailing dyke failures. Proc. Instn. Civ. Engng, 125, 918. 1997.



11. Brackley, I., Swell pressure and free swell in compacted clay. Proc. 3th I.C.E.S. Haifa, Israel, Vol. 1: 169-176. 1973.
12. Casagrande, A., Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, January; reprinted in Contributions to Soil Mechanics (1925–1940), the Boston Society of Civil Engineers, 1948, pp. 257–276, 1976.
13. Chai, J.; Miura, N.; Koga, H., Lateral Displacement of Ground Caused by Soil-Cement Column Installation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers. 2005.
14. Chalkley, M.; Kerr, T.; Parfitt, M.; Greenaway, G., Rehabilitation of the acid leach tailings facility at Moa Nickel in Cuba. CDA 2002 Annual Conference, Victoria, BC, Canada. 2002.
15. Chandler, R.; y Tosatti, G., The Stava dam's failure. Italy, July, 1985. Proc. Instn. Civ. Engng. 113, 67-79. 1995.
16. Coates, T., y YU, H., Waste Embankments. Pit Slope Manual, Canada Centre for Mineral Energy Technology, Ottawa, Report 177.1. 1977.
17. Coleman, J., Stress strain relations for partly saturated soils. Correspondence. Géotechnique 12, No 4: 348-350. 1962.
18. Cui, Y., y Delage, P., Yielding and plastic behaviour of unsaturated compacted silt. Géotechnique, 46 (2): 291-311. 1996.
19. Das, B. Fundamentals of Soils Dinamy, Ed. Elsevier, New York. 1981.
20. Delage, P.; Howat, M., y Cui, Y., The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Engineering Geology, 50: 31-48. 1998.
21. Domínguez, E., Análisis de la Compensación de Movimientos Originados por la Excavación de Túneles. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 2001.
22. Fourie, A.; Blight, G.; y Papageorgiou. G., Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Can. Geotech. J.*, 38, 707–719, 2001.



23. Fourie, A.; y Papageorgiou, G., Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings. *Can. Geotech. J.*, 38, 695–706. 2001.
24. García, R., Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena La Unión (Murcia-España). Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena. 2004.
25. Gens, A., Constitutive modelling of expansive soils. *Unsaturated soils: Recent developments and applications*. Civil Engineering Courses, Barcelona. 1993.
26. Henkel, D., The relationships between the effective stresses and water content in saturated clays. *Géotechnique*, Vol. 10 No. 2, 1960.
27. Holubec, I., The yielding of cohesionless soils. Ph.D. Thesis, University of Waterloo. 1966.
28. Jennings, J.; y Knight, K., A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *Sixth Reg. Conf. for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Durban, South Africa. 1975.
29. Jiménez, S.; y Justo, J., *Propiedades de los suelos y de las rocas*. Geotecnia y Cimentaciones I, Editorial Rueda, Madrid. 1975.
30. Kokusho, T., Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 10, 817-826. 1987.
31. Lambe, T.; y Whitman, R., The role of the effective stress in the behaviour of expansive soils. *Quart. Of the Colo. Sch. Of Mines*, Vol. 54 (4): 33-66, 1959.
32. Lara, J. y Barrera, S., *Presas de Relaves con Muros Resistentes de Arena – Experiencias de Aplicación y Posibilidades de Uso en Países Andínos*. Revista Minería. Lima-Perú. 2002.
33. Olivella, S., Gens, A. y Josa, A., Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Engineering Computations*. 13, 7: 87-112. 1996.
34. Poorooshasb, H., The properties of soils and other granular media in simple shear. Ph.D. Thesis, University of Cambridge. 1961.



35. Proctor, R., Fundamental principles of soil compaction. Engineering News Record 111: 245-248; 286-289; 348-351, 1933.
36. Rico, A. y Del Castillo, H., La ingeniería de suelos en las vías terrestres, No. 1, Limusa, México. 1976.
37. Rodríguez, R., Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2002.
38. Rojas, G., Dynamic Properties and Behaviour of Copper Tailings. Proc. 11th Conf. SM & FE. San Francisco, Vol. 3, pp. 1289-1292. 1985.
39. Seed, H.; y Idriss, I., An Analysis of the soil liquefaction in Niigata earthquake. Proceedings ASCE. 1967.
40. SERNAGEOMIN., Guía para la presentación de Proyectos de Planes de Cierre de faenas mineras. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, 26 p. 2008.
41. Soderberg, R., y Busch, R., Design Guide for Metal and Nonmetal Tailings Disposal. U.S. Bureau of Mines, IC8755. 1977.
42. Surendra, K., Compaction Criteria for Eastern Coal Waste Embankments, ASCE, Vol. 110, N° 2, Febrero, pp. 262-284. 1984.
43. Terzaghi, K., y Peck, R., Mecánica del Suelo en la Ingeniería Práctica. Editorial El Ateneo. 1958.
44. Troncoso, J., Seismic Pore Pressures in Tailings Dams. Proc. of the 7th Panamerican Conference, Vancouver, Canadá, Junio, pp. 641-655. 1983.
45. Tokimatsu, K. and Hosaka, Y., Effects of sample disturbance on dynamic properties of sands. Soils and Foundations, JSSMFE. 1986.
46. Valenzuela, L. y Barrera, S., Large Tailings Dams Current Practice In Chile. X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. México. 1995.
47. Vick, S., Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. Ed. Wiley, New York. 369 p. 1981.



48. Warner, J., Fifty Years of Low Mobility Grouting. Proceedings of the third international conference of Grouting and Ground Treatment, New Orleans, Louisiana. 2003.
49. Wood, D., y Budhu, M., On the Determination of Stress State in the Simple Shear Apparatus. Geotechnical Testing Journal". GT10 DJ. Vol. 2, N2 4, pp. 211-221. 1981.
50. Yoshimi, Y.; Hatnaka, M., y Oh-Oka, H., Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing. Soils and Foundation, JSSMFE. 1978.
51. Zandarín, M.; Oldecop, L. y Rodríguez, R., Stability of a Tailing Dam Considering the Hydro-mechanical Behaviour of Tailings and Climate Factors". Unsaturated Soils. Advances in Geoengineering. D.G. Toll, C.E. Augarde, D. Gallipoli y S.J. Wheeler (eds). Taylor & Francis, London. 2008.

Anexos

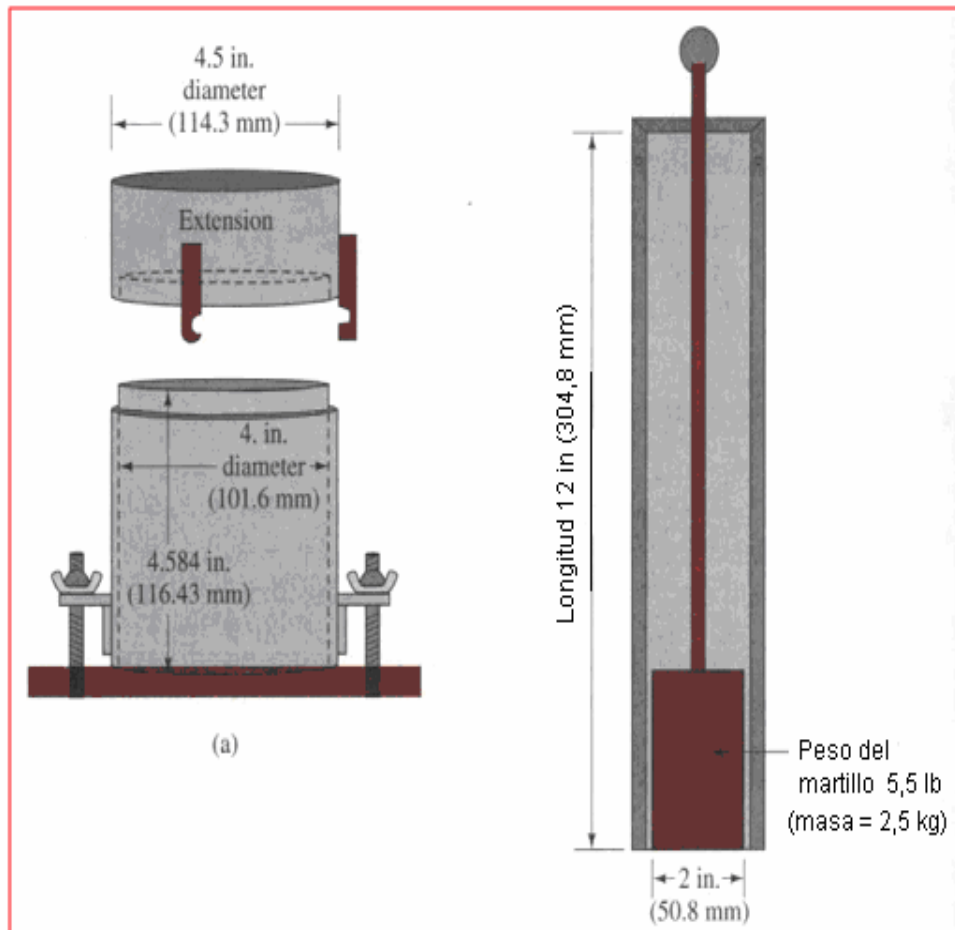
ANEXO 1

Figura 1. Molde de compactación y extensión, con el pisón de 2,5 kg de peso.

ANEXO 2



Figura 2. Anillo de acero empleado para determinar la densidad del material.

ANEXO 3



Figura 3. Vibrador electromecánico.

ANEXO 4



Figura 4. Equipo casagrande.



ANEXO 5



Figura 5. Probetas para la preparación de la hidrometría.



Figura 6. Capas para la formación de los diques.