



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD GEOLOGÍA MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga.

Título: Comportamiento de las propiedades físicas .y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa Níquel SA.

Diplomante: Yaima Campos Quiala.

Tutores: Dr. Rafael M Guardado Lacaba
Msc. Teresa Hernández Columbié.

Moa, 2010

“Año 52 de la Revolución”.

Agradecimientos:

Quiero agradecer en especial a mis padres que ambos han hecho ser todo lo que soy, por su confianza y preocupación constante.

A Maritza Rodríguez Bernal que siempre estará dispuesta a darme su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

Quiero agradecer en especial a mis tutores Rafael M. Guardado Lacaba y Teresa Hernández Columbié.

A José Carmenates Fernández y a Beatriz Reverón Zaldivar por la gran ayuda que me supo dar cuando mas lo necesitaba.

A mis amigas que me apoyaron en los momentos buenos y malos que pase en todos estos años de estudio y por tanto que nunca olvidare.

A todos los profesores del departamento de geología que con su ejecución y sabiduría hicieron posible la culminación de mi carrera.

Dedicatoria

Les dedico de todo corazón este trabajo de diploma a mis padres por ayudarme a ser lo que soy y por todo su cariño a lo largo de toda mi vida y que siempre estaré orgulloso de tenerlos.

A Edith Vargas Leyva que aunque no este presente físicamente le estaré agradecida por darme su apoyo y comprensión cuando yo lo necesitaba.

A la revolución que gracias a ella me permitió estudiar la carrera de ingeniería geológica.

Pensamiento

Un día seremos astrónomos, y otros geólogos y botánicos, otros y otros días químicos.

José Martí...

ÍNDICE:

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA	II
PENSAMIENTO	III
INDICE	IV
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
INTRODUCCION	1
Diseño de la investigación	2
Marco Teórico de la investigación.	3
CAPITULO I.- Características geográficas y condiciones ingeniero geológicas del territorio	27
2.1.-INTRODUCCION	27
2.2.-Ubicación geográfica	28
2.3.- Condiciones ingeniero geológicas que inciden en la estabilidad de las presas colas	29
2.3.1 Clima	29
2.3.2.-Relieve	30
2.3.3.-Geología	30
2.3.4.- Tectónica	32
2.3.5.-Geomorfología	34
2.3.6.- Hidrogeología: (Superficial y subterránea)	35
2.4.- Situaciones de riesgos naturales	36
2.4.1.-Sismos	36
2.4.2.-Inundaciones	37
2.5.- Condiciones ambientales y socioeconómicas existentes en la presa de cola mediante las diferentes etapas de trabajos realizados	38
CAPITULO II. Metodología de evaluación de la estabilidad.	39
Descripción de los métodos usados. Análisis estadístico	
2.1.-Introducción	39

2.2.- Metodología de la investigación	39
2.3 – Descripción y empleo de los métodos de trabajo	42
2.3.1.- Muestreo de Suelo	42
2.3.2.- Extracción de la muestra	42
2.3.3- Contenido de Agua en el Suelo	44
2.3.4- Análisis Granulométrico	45
2.3.5- Límites de Consistencia	47
2.3.6- Clasificación de los suelos	50
2.3.7- Pruebas de Proctor Estándar	51
2.4.-Análisis Estadístico	54
CAPITULOIII. Interpretación de los resultados obtenidos.	60
Comportamiento de las propiedades físicas y la compactación de los materiales de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.	
3.1.-INTRODUCCION	60
3.2- Valoración de las propiedades físicas y compactación de los materiales que conforman los diques de la presa de colas.	60
3.2.1.- Granulometría	61
3.2.2. – Propiedades físicas	64
3.2.3.- Análisis de la compactación	71
CONCLUSIONES.	72
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	74
ANEXOS	75

RESUMEN:

El presente trabajo titulado “Comportamiento de las propiedades físicas .y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa Níquel SA”, tiene como objetivo la evaluación geotécnica de los diques de la presa de colas, a partir de las propiedades físicas y la compactación que influyen en la inestabilidad en los mismos, con vista a prevenir riesgos geológicos. Para cumplir con el objetivo trazado se emplean métodos tradicionales como el del hueco y el anillo para la extracción de la muestra, determinación del contenido de agua con el método estándar, análisis granulométrico por el método mecánico, pruebas del Proctor Estándar para determinación del peso volumétrico seco y humedad óptima del material de construcción.

Como conclusión se valora el comportamiento de las propiedades físicas y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas de la empresa, además se determinan los tipos de materiales presentes en cada período según la clasificación (SUCS) y la carta de plasticidad.

ABSTRACT

The present investigation titled “Comportment of the physical properties and the compaction of the materials that constitute the diques of the waste dam of the Commandant Pedro Soto Alba, Moa Nickel SA Enterprise”, has as its objective the geotechnical evaluation of the diques of the waste dam, parting from the physical properties and the compaction that influence the stability of the diques, in hope of foreseeing the geological risks. In order to comply with the outlined objective traditional methods were used such as, the cavity and the ring for the extraction of the sample, the determination of the water content using the standard method, granular-metric analysis using the mechanical method and Standard Protractor tests for the determination of the optimum dry and humid volumetric weight of the construction material.

In conclusion, the comportment of the physical properties and the compaction of the materials that form the diques of the waste dam were assessed moreover, the types of materials present in each period were determined according to SUCS classification and the letter of plasticity.

INTRODUCCIÓN.

A partir de de los años sesenta comenzó a explotarse, en la mina de la Fábrica Comandante Pedro Sotillo Alba una tecnología novedosa en el mundo. Para ello, fue necesaria la creación de presas de colas para determinados volúmenes de residuos obtenidos por vía húmeda, que permitieran su almacenamiento y desarrollo a lo largo de los años de forma segura y económica.

Para su diseño en la construcción de estas, es necesario conocer las propiedades de los materiales empleados que en ella intervienen y su comportamiento geotécnico, de estabilidad en el proyecto de construcción, explotación y cierre.

En nuestro caso, el análisis de estabilidad de los taludes de la presa de colas ha estado basado en los siguientes aspectos:

- Caracterización geotécnica de los materiales que componen los taludes de la presa.
- Condiciones ingeniero geológicas que inciden en la estabilidad de la presa.
- Empleo de una metodología y de métodos de análisis más adecuados.
- Evaluación de las propiedades físico-mecánicas en la presa de colas.

El desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías en la industria minera del níquel en Cuba han hecho posible la explotación eficiente y con mayores volúmenes de minerales lateríticos de níquel y cobalto generando un aumento de residuos mineros cuya disposición final debe hacerse empleando métodos seguros y económicos de presas de colas.

Por lo cual el presente trabajo de diploma titulado “Comportamiento de las propiedades físicas .y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Mba Níquel SA” tiene como problema:

Problema: La necesidad de conocer las propiedades físicas y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba para establecer criterios sobre la estabilidad de estos materiales de préstamo.

Objeto de estudio: Las propiedades físicas y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba

Objetivo General: Valorar el comportamiento de las propiedades físicas y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba para establecer criterios sobre la estabilidad de los mismos.

Objetivos Específicos:

1. Determinar las propiedades físicas de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba
2. Determinar la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba

Hipótesis: Si se caracteriza desde el punto de vista geotécnico los materiales que constituyen los diques de la Presa de Colas de la Empresa Pedro Soto Alba a partir de sus propiedades físicas y la compactación, entonces se puede valorar el comportamiento en el tiempo de las mismas.

Aportes científicos:

1. Determinación de las propiedades físicas de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba
2. Determinación de la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba.
3. Valoración en el tiempo del comportamiento de las propiedades físicas y la compactación de los materiales que constituyen los diques de la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba para establecer criterios sobre la estabilidad de los mismos.

Marco teórico de la investigación

Con esta investigación se pretende conocer con claridad todos los problemas relacionados con la inestabilidad de los taludes de la presa de colas de la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba, para ello se estudiaron todas las propiedades físico mecánicas que traen como consecuencia el fallo de este tipo de estructura.

Las presas de colas son estructuras geotécnicas complejas, presentan algunos aspectos constructivos y de funcionamiento similares a las presas de embalse de materiales sueltos. La mayor parte de estos, existentes en la actualidad se han construido mediante el sistema de relleno hidráulico. Los residuos del proceso de extracción, o sea roca finamente molida mezclada con agua y con la consistencia de un lodo, son bombeados a través de tuberías hacia el depósito. Forman parte de las operaciones minero-metalúrgicas. Deben gestionarse a largo plazo para asegurar que se logre el cumplimiento de las regulaciones existentes en materia de protección del entorno. Actualmente los problemas ambientales que representan las colas ante una rotura de estas estructuras, se han convertido en temas análisis de investigaciones medioambientales, haciendo especial énfasis en el campo de la geotecnia y la hidrogeología.

Estas estructuras pueden ser construidas con los mismos residuos o con otro material de préstamo, debe crecer gradualmente en altura, al ritmo de la producción de residuos de la mina. 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.
- Sobrepasso. Erosión del dique. Tubificación.
- Falla por problemas en las estructuras auxiliares.
- Problemas de fundación
- Terremotos.

Algunos de los fallos anteriormente mencionados y algunas situaciones que se han producido en algunas partes del mundo, se explican a continuación:

Deslizamiento del talud.

El deslizamiento de un talud ocurre cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo, exceden la resistencia al corte del material.

Sobrepaso, Tubificación y Erosión.

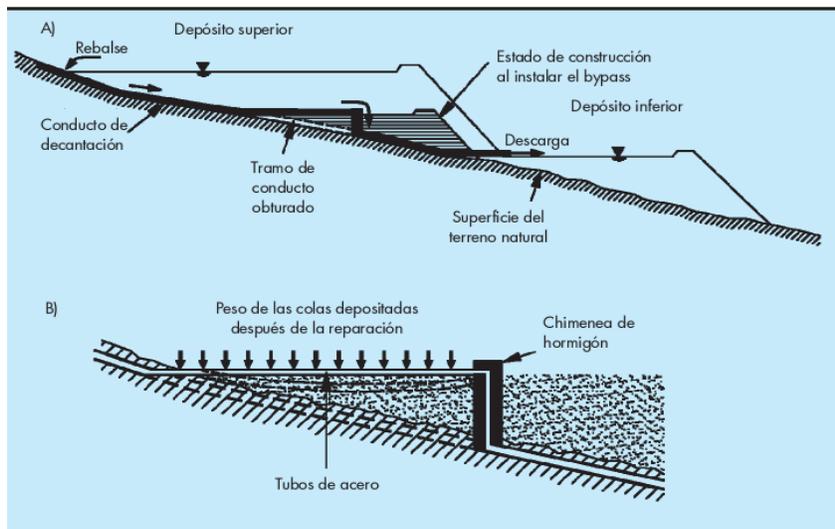
A lo largo del proceso de construcción y llenado, la morfología y estructura de un depósito de residuos mineros cambia en el tiempo. La forma de operación de la presa puede tener una influencia importante en el riesgo de sobrepaso, tubificación o erosión.

Una operación inadecuada en el vertido de los residuos puede hacer que la altura de resguardo disminuya a niveles peligrosos. La obstrucción de tuberías de desagüe es otro problema que puede llevar al sobrepaso. El hecho de que, por razones de protección del medio ambiente, el agua almacenada y también la que ingresa accidentalmente en la presa no se pueda verter al medio, condiciona fuertemente el diseño y la operación. Si el depósito es de tipo anular, el único aporte de agua que puede recibir es el de las precipitaciones, pluviales o níveas, que caigan en el área que ocupa su planta. Si, en cambio, el depósito está ubicado en un valle, con una presa de cierre por el costado de aguas abajo, entonces las previsiones hidrológicas deberán tener en cuenta el área de captación de la cuenca y el volumen de agua que puede generar una lluvia o deshielo. En algunas presas de este tipo se construyen estructuras de desvío (canales o tuberías) para evitar que el agua de escurrimiento superficial ingrese en el depósito. Un ejemplo interesante de falla por sobrepaso es el de la presa de Merriespruit (Sudáfrica), ocurrida en 1994. La presa era de tipo anular con planta rectangular y tenía al momento de su rotura 31 metros de altura. El recrecimiento se hacía hacia aguas arriba, utilizando los mismos residuos mineros como material de construcción y permitiendo su secado para favorecer su consolidación por acción de las fuerzas capilares. Casi un año antes de ocurrir la falla, el llenado del depósito fue suspendido por haber presentado problemas de estabilidad. Sin embargo, de forma esporádica, ocurrieron escapes de residuos mineros y agua, desde un depósito vecino que continuaba en operación. A consecuencia de esto la laguna de decantación fue empujada gradualmente hacia el borde que luego fallaría. El proceso acaba por desestabilizar el talud de la presa, provocando la aparición de chimeneas o deslizamientos y en definitiva la aparición de una brecha. La brecha dejó escapar 600000m³ de residuos mineros que fluyeron a lo largo de 3Km, provocando 17 muertos. La pérdida de material genera un proceso de erosión retrógrada, que va ampliando la vía de agua y por tanto el caudal y la capacidad de provocar más erosión.

Falla de estructuras auxiliares.

La mayor cantidad de incidentes originados en las estructuras auxiliares se deben a fallas en los sistemas de decantación del agua sobrenadante del depósito. Como ejemplo interesante de falla iniciada por un problema en una tubería de decantación, se puede citar el del complejo de dos presas de residuos mineros de Stava (Italia), cuyo colapso ocurrió en 1985. Chandler y Tosatti (1995) propusieron como factor más probable de inicio de la falla, la fuga de agua del conducto de decantación del depósito superior. A un cierto punto de la construcción de la presa, este conducto se obstruyó. Para solucionar el inconveniente se construyó un by-pass (Figura 1). Esto se hizo mediante un tubo de acero horizontal que se acopló al extremo libre del conducto de decantación. Excavando los residuos mineros hasta descubrir un tramo de conducto más allá de la obstrucción, se construyó una chimenea que conectaba el otro extremo del tubo de acero con el conducto de decantación. El tubo de acero estaba directamente apoyado sobre la superficie de los residuos mineros recientemente vertidos. Luego, cuando el depósito continuó creciendo, el tubo quedó inmerso en la masa de residuos mineros, que son bastante compresibles. Bajo el peso de las nuevas capas, el tubo pudo haber sido arrastrado hacia abajo y en un cierto momento su extremo arrancado de la chimenea. Esto permitió que el agua transportada por el tubo escapara directamente a los residuos mineros, haciendo que la superficie freática en ese sitio se elevara.

Figura 1. Complejo de Stava (Italia) a) Esquema de la reparación realizada para salvar un tramo de conducto de decantación obstruido en la presa superior. b) Detalle



Deslizamiento sobre la fundación.

El deslizamiento de la presa de Aznalcollar (España, 1998) fue provocado por una serie de problemas en la fundación de la presa. Una sección de 600 metros de longitud del costado S-E se deslizó una distancia de 60 metros en dirección al cauce del río Agrio, sin que se detectaran señales previas que permitieran prever el accidente. Por la brecha producida se escaparon 7 millones de metros cúbicos de residuos mineros fuertemente ácidos, que contaminaron los valles de los ríos.

Terremotos.

Un ejemplo de fallas en los taludes de las presas de relaves producidos por terremotos fue el ocurrido en Northridge (California, 1994) que provocó la falla de la presa de Tapo Canyon, de 24 metros de altura, utilizada para el almacenamiento de residuos finos provenientes del lavado de áridos. La falla implicó el flujo de una gran cantidad de residuos a lo largo de 180 metros aguas abajo. Afortunadamente, por estar ubicada en una zona despoblada, no provocó víctimas ni otras pérdidas económicas importantes. El depósito se había iniciado en la depresión de una antigua cantera. Para facilitar el drenaje durante su explotación se había abierto un canal en la roca que desaguaba en un arroyo vecino (Figura 2), que se cerró con material rechazado de la explotación. Luego la presa continuó recreciéndose hacia aguas arriba con el mismo material. Al momento de la falla, la presa llevaba dos años inactiva, ya que se había detenido su recrecimiento y el vertido

de residuos. Sin embargo, en la mitad este se realizaba el lavado de los camiones mezcladores de hormigón, por lo que en la mitad oeste del depósito existía una laguna en contacto directo con la presa. El movimiento indujo la licuación del material de la presa, que se encontraba saturado debido a la proximidad de la laguna, y también de los residuos almacenados. Esto produjo una brecha de unos 60 metros de ancho por la que escaparon los residuos mineros licuados. Es probable que la falla se haya iniciado en la zona del antiguo canal de desagüe con la licuación del material de tapón y que ello haya provocado la falla en cadena de resto de la presa y la licuación de los residuos.

Figura 2: Vista aérea de la presa Tapo Canyon previa a su rotura.



La construcción de grandes depósitos para almacenar colas mineras surgió como una necesidad recién a mediados del siglo XX.

El almacenamiento de las colas es uno de los principales proyectos del proceso minero-metalúrgico. La construcción de presas para confinar los residuos mineros metalúrgicos es una innovación del siglo XX. Antes de la llegada de la flotación y el tratamiento de minerales de baja ley (contenido mínimo industrial), los procesos mineralúrgicos se llevaban a cabo con partículas mucho más gruesas y las colas no se acopiaban sistemáticamente. Las colas de operaciones de recuperación de mineral eran

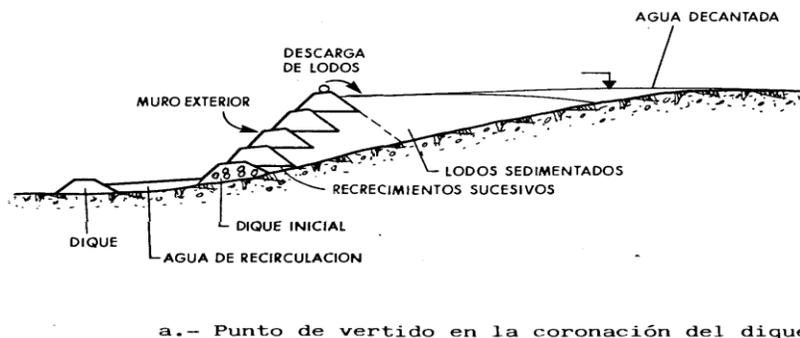
generalmente descargados en una superficie cerca de la mina, o en las aguas superficiales más cercanas. Todavía hay algunos vertidos a ríos o al mar, pero en la mayoría de los casos, los diques de estériles se han convertido en partes esenciales de la explotaciones mineras. Su diseño ha evolucionado, desde un a construcción rudimentaria, a los actuales estándares de de alta ingeniería, en la que se utiliza la geotecnia, ingeniería geológica y campos asociados (Markland and Eurenus, 1976; quintana, 1998).

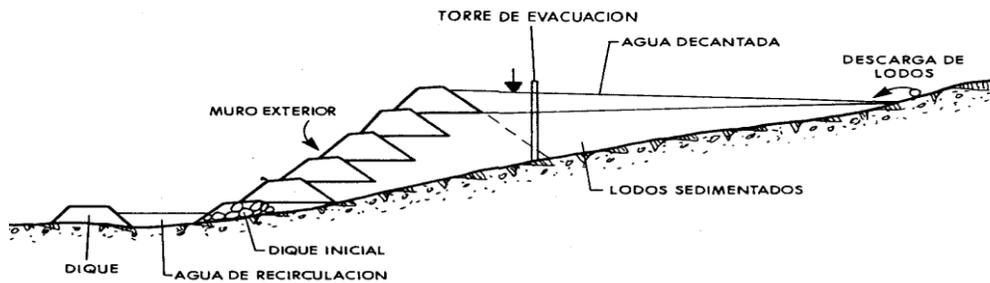
En primer lugar, es necesario definir que es una presa de colas, para lo cual puede comenzarse diciendo que es recinto capaz de contener y almacenar lodos de desechos, ya sean estos procedentes de una operación minera o de una industria.

De esto se desprende que las partes de una presa de colas han de ser:

- Una estructura de cierre perimetral, que puede ser natural o artificial
- Un espacio disponible para el vertido de la suspensión de los lodos. Este espacio, al explotar la presa, 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 Fig.3. presenta un esquema de una presa de decantación y sus partes según la ubicación del punto de vertido de los lodos.

Figura 3. Partes de una balsa de decantación según el punto de vertido.





b.- Punto de vertido en la cola del dique

Es evidente que el vertido de colas de la presa, presenta una situación más desfavorable desde el punto de vista de la inestabilidad 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.

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 presa de decantación estable en un entorno dado, manteniendo fijos una serie de aspectos, tales como el sistema de vertido, la ubicación de los puntos de descargas, las propiedades de los lodos, el volumen a almacenar y la velocidad de recrecimiento que viene condicionada por el sistema de explotación.

En caso de las presas de colas, el método constructivo está relacionado con el diseño, de tal forma que en muchos casos, la selección de un diseño particular condiciona el método de construcción y viceversa. Lo que sí está claro es que los métodos tienen a la utilización óptima de las colas en la construcción del depósito de almacenamiento.

Las balsas de decantación son obras muy variables, cuya clasificación puede hacerse como sigue:

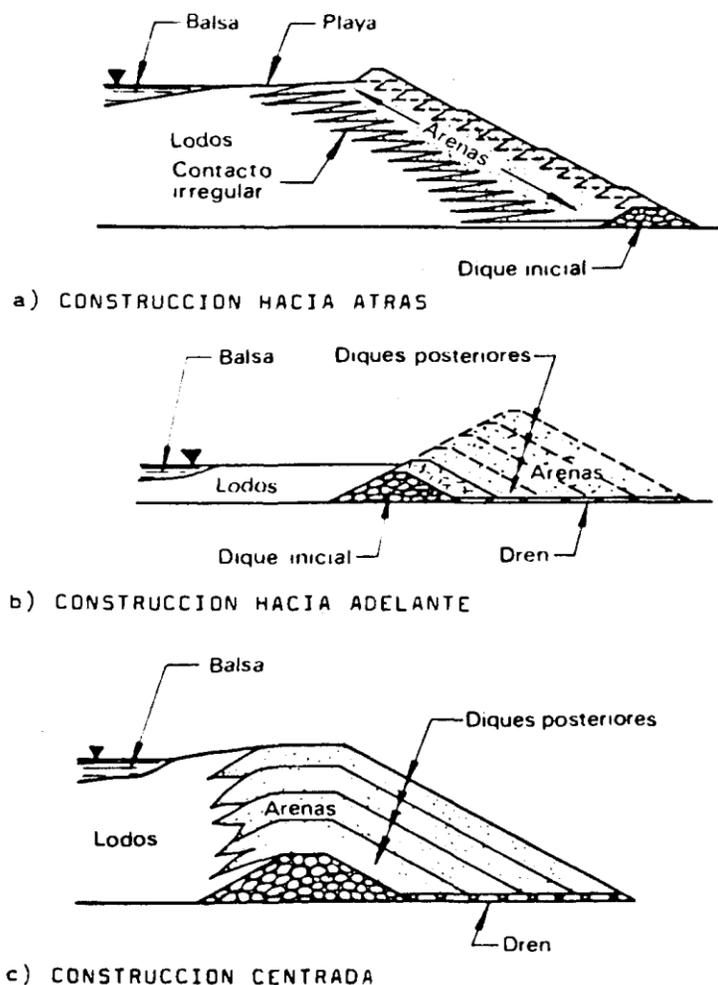
1. Según los materiales empleados en la construcción del dique exterior y los recrecimientos sucesivos:
 - a. Empleo de materiales de préstamo natural, proveniente de depósitos cercanos al emplazamiento de la balsa.
 - b. Empleo de una fracción de los residuos, generalmente las arenas, separadas por ciclonado o por segregación en la playa de vertido.
 - c. Empleo de mezclas de suelos naturales con fracciones de residuos.

2. Según el método de recrecimiento (figura 4)
 - a. Hacia atrás (“aguas arriba”), *“upstream”* cada construcción se hace sobre el muro existente y el borde de playa detrás del muro. El incremento de peso de la presa se puede repetir varias veces pero el sistema tiene una desventaja en el sentido que hay una línea de debilidad potencial en la base de cada recrecimiento, ya que muro se cementa sobre material grueso y fino. Este sistema todavía se usa en las áreas más secas del mundo, donde los niveles de agua en el interior de la presa se pueden mantener al mínimo (Junghans and Helling, 1998).
 - b. Hacia delante (“aguas abajo”), *“downstream”* (Figura 4b): ha llegado a ser el más ampliamente usado. Habitualmente, se construye una barrera impermeable en la cara del muro de la presa que está en contacto con el depósito y se provee de un drenaje interno para asegurar que el nivel freático dentro del muro se mantenga lejos de cada cota de aguas arriba. El espesor de la parte baja del muro se incrementa dependiendo de la altura. Esto incrementa la estabilidad, pero requiere aportes exponenciales crecientes de material según la subida gradual del muro (Markland and Eurenus, 1976; Junglands and Helling, 1998).
 - c. De línea central (“por el eje”), *“centralice”* (figura 4 a) combina alguna de las ventajas de los otros métodos (con una mejor estabilidad sísmica que el método *“upstream”*) y con menos requerimientos de volumen de material en los recrecidos que con el

sistema “*downstream*”: sin embargo, la capacidad de retención de agua no es tan buena como la del método “*downstream*” (Markland and Eurenus, 1976; Junghans y Helling, 1998).

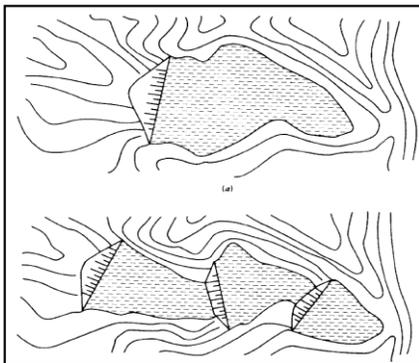
- d. De línea central desplazada (“eje desplazado”), “*modified centraline*” (figura 4c) en este método lo que se realiza es un recrecimiento del muro de contención de la presa de la misma forma que el método de línea central, pero con una prolongación de la longitud del muro de la presa aguas abajo (Junghans y Helling, 1998).

Figura 4. Métodos de recrecimiento empleados en las presas de colas. (Rodríguez Ortiz, J.M 1986).

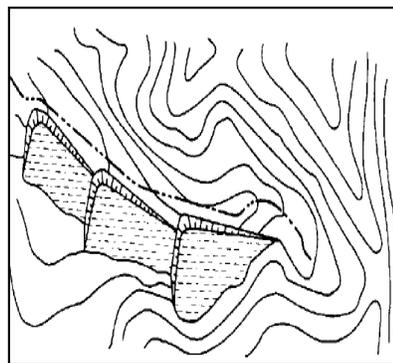


La ubicación de las presas de colas depende en gran medida de varios factores; el relieve y de las rocas y suelos que lo conforman, en ello la permeabilidad tiene un peso enorme. Las presas de relave minero según estas condicionantes se pueden clasificar en: A.- Cerramiento de valles (cross valley) B.-de ladera (valley side) C.-Fondo del valle (valley botton), o junto al cauce. (Figura 5).

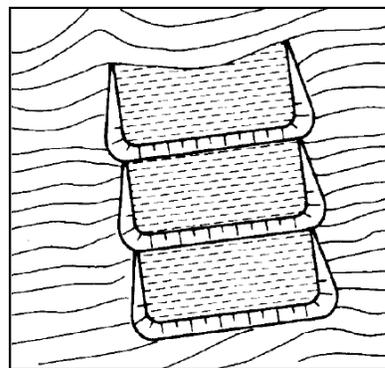
Figura 5.- Tipos de presas de acuerdo a su ubicación: A.- Cerramiento de valles (cross valley) B.-de ladera (valley side) C.-Fondo del valle (valley botton), o junto al cauce.



A: En valle



B: En ladera



C: Junto al cauce de un río

La incidencia de los costos de la inversión de las presas de colas posee una representatividad de aproximadamente el 20 % de los costos totales, siendo los mismos

improductivos pero necesarios, se debe minimizar los mismos sin poner en riesgo la seguridad de la obra y del medio ambiente.

Cuba inicia la construcción de presas de colas en la década de los 40, hasta la fecha estas obras se han transformado en grandes fuentes de contaminación y destrucción de los ecosistemas.

Las empresas mineras enfrentan hoy el legado de una explotación irracional de los recursos, y 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 antrópicas.

Las presas de colas se encuentran dentro de los municipios de Mayarí y Moa, la gran mayoría están construidas muy cercas del mar, expuestas a los vientos, sus características geomorfológicas le imprimen, condiciones muy propias dentro del contexto climático de la provincia, estas condiciones se distinguen con claridad por las características pluviométricas muy exclusivas de ambos municipios e incluso dentro del mismo territorio existen variaciones por la diferencia de altitudes y zonas de barlovento y sotavento, cuestión esta que se refleja en las diferencias pluviométricas de los mismos.

FORMAS DE VERTIDO DE LOS RESIDUOS

Las colas de los procesos industriales pueden verterse en los depósitos de tres formas fundamentales: fluidas, secas, pastas (slurry), siendo este último el más utilizado y el más ampliamente conocido (Fig.6) (Yasuhara et al., 1994). El método seco y húmedo (la masa de residuo no se satura, para evitar la generación de lixiviados) es usado mayoritariamente para los residuos de la industria que queman combustibles fósiles como las centrales térmicas. El hecho de agregarles cierta humedad facilita su transporte y almacenamiento si que sea erosionado con facilidad por el aire. Si la masa de residuos derivados de este proceso se satura con agua aumenta el riesgo ambiental de estos, pues generalmente presentan grandes concentraciones de azufre y algunos sulfuros.

Figura 6: Formas de vertido de los residuos en los procesos industriales: (Yasuhara et al., 1994).



Las colas según la clasificación de sustancias tóxicas peligrosas del convenio de Basilea, se denominan como A 4090, las sustancias que la hacen peligrosa son el H_2SO_4 diluido y los metales diluidos con un pH muy bajo, además el agua que le acompaña a la pulpa es también muy ácida (con pH entre 3,0 y 3,5) con elevadas concentraciones de sulfatos y metales pesados.

La granulometría es limo-arcillosa, con predominio de fracciones limosas. El diámetro de las partículas varía entre 100 y micras.

La producción de concentrado de níquel+cobalto genera un volumen de colas o residuos de millones de metros cúbicos. La elevación de los planes de producción incrementan considerablemente los volúmenes de residuos anualmente, basados en las densidades obtenidas históricamente para las colas.

PROBLEMAS DE ESTABILIDAD EN LAS PRESAS DE COLAS

● **Tipos de problemas**

Los problemas de estabilidad en presas de colas pueden clasificarse en tres grupos generales:

1. Problemas de estabilidad estática: Es necesario el establecer un factor de seguridad adecuado frente a un deslizamiento total o parcial que afecte la presa o su cimentación, cuando actúan las cargas máximas permanentes.
2. Problemas de estabilidad interna: Se refieren a los efectos de las acciones interiores que actúan sobre la presa, responsables de fenómenos tales como fisuración, erosión externa y erosión interna o sifonamiento.
3. Problemas de estabilidad dinámica: Se refieren a la respuesta de la presa y su fundación ante acciones dinámicas, que pueden ser generadas por sismos o explosiones en las zonas de minería.

Todos estos problemas deben analizarse tanto para el final de la construcción de la presa como para las distintas fases constructivas, teniendo en cuenta la evolución de las propiedades geotécnicas de presa y lodos, debidos a su consolidación, filtraciones, etc.

1. Estabilidad estática

Los principales problemas que pueden presentarse en una presa en función del material de cimentación.

La selección del emplazamiento y el estudio geotécnico del mismo son temas de gran interés dentro del diseño de una presa de residuos. La topografía muchas veces condiciona el método constructivo y, por tanto, todos estos factores deben ser analizados con detalle para evitar problemas en el futuro.

El análisis de estabilidad de taludes en presas suele hacerse aplicando diferentes métodos:

* Métodos clásicos

- a) Roturas planas en taludes indefinidos
- b) Análisis de equilibrio total en una masa deslizante, de desarrollo circular o logarítmico
- c) Métodos de bloques, con superficie de rotura poligonal

* Métodos de rebanadas

- a) Método de Bishop
- b) Método de Janbu
- c) Otros métodos, como el de Morgenstern-Price, Spencer, etc.

* Métodos de análisis numéricos detallados

- a) Método de Elementos Finitos
- b) Método de las características

Los métodos clásicos de Análisis de Estabilidad de Taludes, suponen condiciones de equilibrio límite y precisan de los siguientes pasos previos al cálculo:

1. Definición de una superficie de rotura a través de la cual el talud teóricamente deslizará.

2. Definición del conjunto de acciones exteriores que condiciona el estado tensional del talud en el momento de la rotura.
3. Definición de los valores de presiones intersticiales en el momento de la rotura.

Con esta información, se define el factor de seguridad del talud de la presa, F , como el cociente entre el máximo esfuerzo cortante disponible, $\tau.F$, por la masa de suelo para oponerse al deslizamiento (resistencia máxima) y el esfuerzo cortante que es necesario movilizar para equilibrar las acciones actuantes, $\tau.m$.

$$F = \frac{\tau.F}{\tau.m}$$

Si $F > 1,0$ el talud es estable, siendo deseables valores de F superiores a 1,3, al menos.

Se analizan varias posibles superficies de rotura y la más crítica de todas ellas, es decir, la que presenta el menor factor de seguridad, es la que determina el factor de seguridad del talud. En este tipo de métodos si al hallar F_{min} , no se establece ninguna hipótesis incorrecta, es razonable suponer que el factor de seguridad real, F_r , no será nunca inferior a F_{min} , lo cual es equivalente a decir que se habrá encontrado una cota límite superior y por tanto, está plenamente justificado el hecho de hacer la búsqueda del mínimo de F . Los métodos de cálculo habituales son sensibles a los valores de cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ) del suelo a estudiar. Por tanto, la selección de los ensayos a realizar debe hacerse en base a las trayectorias de tensiones que se esperan en el campo. Adicionalmente, el considerar las variaciones de C y ϕ a lo largo de la superficie de deslizamiento, afecta al cálculo del factor de seguridad. Por ejemplo, en un terraplén de arena sobre base dura, el aumentar el ángulo de fricción entre 5° y 6° a lo largo de la superficie de rotura del talud, lleva a un aumento del 15 al 20% en el coeficiente de seguridad. Estas diferencias en el caso de una presa de residuos, pueden significar la ruina de la obra, puesto que los factores de seguridad adoptados son, generalmente, bastante bajos, según se verá más adelante en detalle.

Los métodos más empleados en el estudio de la estabilidad en presas de residuos suelen ser los de rebanadas, que consisten en asumir una línea de rotura y dividir la masa deslizante en rebanadas verticales, planteando para cada una de ellas las condiciones de equilibrio. Dependiendo del detalle de interacción entre rebanadas, que afecta a las ecuaciones de equilibrio, se obtienen los diferentes métodos de cálculo existentes. La selección de un método u otro, depende de las condiciones reales del talud a estudiar, de la experiencia obtenida por la aplicación del método a problemas concretos, etc.

El método de Fallenius-May, el más primitivo, establece el equilibrio de momentos y considera que las fuerzas entre rebanadas son paralelas a la línea de deslizamiento, lo cual lleva a una solución muy sencilla del problema. La validez de esta hipótesis es muy dudosa en el caso de presiones intersticiales altas.

El método de Bishop, muy difundido, establece un equilibrio de momentos y presenta dos variantes: La primera es un análisis simplificado del problema, en el cual se consideran nulas las fuerzas verticales T entre rebanadas y la segunda es un análisis completo que carece de solución matemática y que se resuelve mediante tanteos sucesivos ajustando las fuerzas T y el factor de seguridad F .

El método de Janbu se basa en un análisis del equilibrio de fuerzas verticales y horizontales. En el estudio de reptaciones y deslizamientos bastante planos, parece más importante el equilibrio de fuerzas horizontales que el equilibrio de momentos. Las ecuaciones del método carecen de solución analítica, de tal forma que, para resolver el problema, se plantea -en una primera aproximación que estas fuerzas verticales T son nulas y, luego, se dan normas para obtenerlas en una segunda aproximación.

El método de Morgenstern-Price es un procedimiento capaz de satisfacer las tres condiciones de equilibrio: fuerzas verticales, fuerzas horizontales y momentos. Este método supone que la fuerza vertical T es una función de la horizontal E del tipo:

$$T = \lambda f(x)E$$

donde $f(x)$ es una función a definir por el calculista en base al tipo de terreno y las características del talud, que tiene como variable independiente la abscisa x horizontal de la definición geométrica.

El parámetro λ es un factor común de corrección en todas las rebanadas que garantiza la condición de equilibrio.

Estos métodos de rebanadas suelen resolverse con el empleo de un programa de ordenador que simplifica notablemente el proceso de iteración.

Los métodos numéricos plantean soluciones completas al estudio de la estabilidad de los taludes, aunque su generalización no es tanta como la de los métodos clásicos, por requerir un conocimiento mayor del suelo y sus propiedades para la aplicación de los modelos matemáticos correspondientes.

Las normas soviéticas sobre presas de residuos no aplican los métodos tradicionales de estabilidad de taludes, sino que estiman el dique, junto con una zona de lodos gruesos consolidados (del orden del 30% de los lodos vertidos), como conjunto resistente y el resto de los lodos se considera como un fluido denso que actúa contra el dique.

Según Melentiev, el ancho del dique a considerar a efectos resistentes, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$X = g(0.1 \text{ mm}) \cdot L$$

$$X \geq L_{\min} = h(m_1 - m_2)$$

donde:

X = ancho del dique a considerar

$g(0,1 \text{ mm})$ = contenido en tanto por 1 de tamaños superiores a 0,1 mm
en lodos de vertido

L = distancia del borde exterior del dique a la chimenea de drenaje

h = altura de los lodos de la balsa

$m_1 = 1/\alpha$ (, siendo α (el gradiente piezométrico admitido (0,07 a 0,125)

m_2 = talud (horizontal/vertical) del dique

Esta hipótesis de caras paralelas resulta muy pesimista, por lo que otros autores dan una inclinación variable a la cara interior del dique. En este caso, el ancho del dique en la cresta se calcula entre el 20% y el 40% de la altura de los lodos.

La causa fundamental de los accidentes en balsas de decantación ha sido, en muchos casos, la falta de un diseño racional y la existencia de una construcción incontrolada. En varias ocasiones, el fallo se ha producido al recrecer excesivamente balsas antiguas, sin un estudio adecuado de lo que ya existía.

McIVER (1961) establece que, al efectuar los análisis de estabilidad, debe considerarse una anisotropía horizontal, debida a la sedimentación diferencial de los residuos a partir del punto de vertido, y otra por la consolidación vertical progresiva. En muchos casos, se presentan costras endurecidas por efecto de paralizaciones temporales de la explotación, que inducen aún cambios mayores en la permeabilidad.

Un parámetro fundamental al calcular la estabilidad es la velocidad de deposición de los lodos, pues, de ella, depende el grado de disipación de las presiones intersticiales en el cuerpo del dique. En muchos casos, la velocidad de construcción es limitada por el riesgo de rotura a través de capas blandas en la cimentación (ESCARIO y JUSTO, 1971). Con velocidades de deposición de los lodos inferiores a 2 m/año, puede garantizarse que habrá una disipación de las presiones intersticiales en residuos arenosos, lo cual permite contar con un cierto grado de consolidación en el material. En el caso más frecuente de

velocidades del orden de 6-9 m/año, los lodos no han alcanzado prácticamente ningún nivel de consolidación y por ello el núcleo de la balsa se encuentra sometido a presiones intersticiales considerables. Como ya se ha señalado antes, la colocación lenta de los lodos permite la formación de un depósito drenado cuya resistencia al corte oscila entre media y alta (TRONCOSO, 1983).

2. Estabilidad dinámica

Los lodos del estanque son materiales sueltos con granulometría uniforme y, por tanto, muy susceptibles de sufrir licuefacción bajo acciones dinámicas. De hecho, las principales catástrofes ocurridas en presas de residuos han sido causadas por licuefacción durante movimientos sísmicos (Chile, Perú, etc.).

SEED et al., (1983) han presentado un método de evaluación del potencial de licuefacción basado en el ensayo estándar de penetración (SPT), sin necesidad de hacer cálculos apreciativos de densidad relativa. El método consiste en unos gráficos que relacionan la tensión tangencial cíclica relativa (τ/σ'_v) con el número de golpes del ensayo de penetración estándar, corregido para una presión de confinamiento de 96 kPa ($N_{1,96}$), función de la magnitud del terremoto.

El valor de N corregido, se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$N_{1,96} = C_N \cdot N$$

N = Número de golpes del ensayo SPT

C_N = Factor de corrección (se obtiene de tablas función de la magnitud probable del sismo a considerar).

TATSUOKA et al., (1980) recomiendan aplicar la siguiente correccional hallar N_1 , en función de la granulometría del suelo:

$$N_1 = C_N - 16.7 \log \frac{D_{50}}{0.4}$$

para $0,40 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0,60 \text{ mm}$

SEED et al., (1983), para el caso de arenas limosas con D_{50}

$0,15 \text{ mm}$, recomiendan:

$$N_1 = N.C_N + 7,5$$

Las relaciones de esfuerzo cíclico que se desarrollan en el campo durante el movimiento sísmico, responden a la expresión:

$$\frac{(th) \text{ promedio}}{\sigma'_{v_0}} \cong 0.65 \frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v_0}}{\sigma'_{v_0}} r$$

En la cual $a_{m\acute{a}x}$ es la aceleración de los residuos en superficie calculada a partir del estudio de riesgo sísmico; σ_{v_0} tensión total vertical sobre la capa en estudio; σ'_{v_0} tensión efectiva inicial sobre la capa en estudio; r_d factor de reducción de esfuerzos, que varia entre 1,0 y 0,9 según la profundidad.

Con las ecuaciones A y B, y los resultados del ensayo de penetración (SPT), se obtienen pares de puntos que se representan en un grafico, determinándose así la posibilidad de licuefacción. MATYAS et al., (1984) han realizado un estudio de este tipo sobre residuos de uranio.

FLORIN e IVANOV (1961) han propuesto un método empírico para evaluar el potencial de licuefacción a partir del ensayo de explosión ("blasting test"), según el cual existe riesgo de licuefacción si el asentamiento promedio producido por una carga explosiva en un radio de 5 m, es superior a 0,1 m. Este método no tiene ningún fundamento teórico.

En los últimos quince años, se han realizado numerosos estudios sobre licuefacción de materiales no cohesivos. Estos estudios llevan a concluir que el potencial de licuefacción de un material arenoso depende de:

1. Densidad relativa inicial del residuo (en caso de ser arenoso)
2. Presión efectiva de la masa de suelo
3. Magnitud de la tensión cortante cíclica
4. Duración del fenómeno sísmico.

En arenas con densidad relativa superior al 60% no se observa licuefacción. En la bibliografía se reseñan casos de arenas con densidad relativa del 70% que no se licuan aun en el caso de aceleraciones de 0,15 g. Estas densidades relativas pueden alcanzarse con facilidad dando a los residuos una ligera compactación; pero esto no es posible en la disposición de los lodos vertidos por vía húmeda en una balsa.

Estos lodos se depositan con densidades relativas del orden del 20-40% y por tanto con un elevado potencial de licuefacción; de manera tal que, en el diseño de la obra, debe preverse la posibilidad de que la masa de lodos licue y ejerza una fuerza de magnitud considerable contra la presa de cierre.

La presión efectiva es una función del grado de disipación de las presiones de poros. En el caso de los lodos, por tratarse de materiales de baja permeabilidad, y alto grado de saturación, los depósitos mantienen elevadas presiones intersticiales durante largos

periodos de tiempo y, por tanto, los esfuerzos efectivos en la masa de suelo son muy bajos.

La magnitud de la tensión cíclica puede evaluarse a través de un estudio de riesgo sísmico y depende de la zona donde se construya la obra. Lo mismo puede decirse para la duración del sismo. En el caso de que los lodos licuen, es necesario conocer el movimiento que tendrá lugar, con el objeto de poder elaborar mapa de inundación.

MORGENSTERN (1967); JOHNSON (1965) y HAMPTON (1969) han estudiado el movimiento de los lodos procedentes de sedimentos marinos, empleando modelos viscofriccionales, cuya aplicación a los residuos de minas esta limitada por la naturaleza no uniforme del movimiento de estos.

JEYAPALAN et al., (1983) han realizado varios estudios, asimilando el comportamiento de los lodos licuados al de un fluido plástico de Bingham, caracterizado por una resistencia al corte, τ , y una viscosidad plástica, η . El estudio se presenta en dos regimenes: Laminar y turbulento.

Estas investigaciones concluyen que los residuos de arcillas fosfáticas, al licuarse, se mueven en régimen turbulento, en tanto que el resto de los residuos lo hace en régimen laminar. El estudio de los parámetros para el análisis de un flujo de lodos licuados mediante un modelo de fluido plástico de Bingham es un campo sobre el que se ha investigado muy poco y, por lo tanto, se precisan estudios posteriores para poder aplicar el modelo a un número mayor de casos.

HUTCHINSON y BHANDARI (1971) estudiaron el movimiento de lodos licuados, concluyendo que la causa fundamental del mismo es la elevada presión intersticial que se desarrolla.



Los análisis de estabilidad se hacen considerando diferentes alturas de la balsa, variando la posición de la línea de saturación y las aceleraciones que puedan tener lugar. Este análisis es complicado y además, hay que conocer los parámetros de respuesta dinámica del terreno, que pueden evaluarse mediante ensayos de carga cíclica. Estos ensayos presentan severas limitaciones en su aplicación a lodos.

Capítulo I Características geográficas y condiciones ingeniero geológicas del territorio.

1.1- INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra en el sistema montañoso de Nipe-Sagua-Baracoa, y su altura predominante es el pico El Toldo con 1 175m. Su red hidrográfica está bien desarrollada y cuenta con las cuencas de los ríos, Moa, Cayo Guan, Quesigua, Potosí, Semillero, Cupey, Yamanigüey y el jiguaní, el cual forma parte de los límites con el municipio de Baracoa.

Prevalecen los suelos ferríticos púrpuras, hidromórficos y fersialítico, cubiertos con espesos bosques de pinos y en menor cuantía por otras formaciones vegetales.

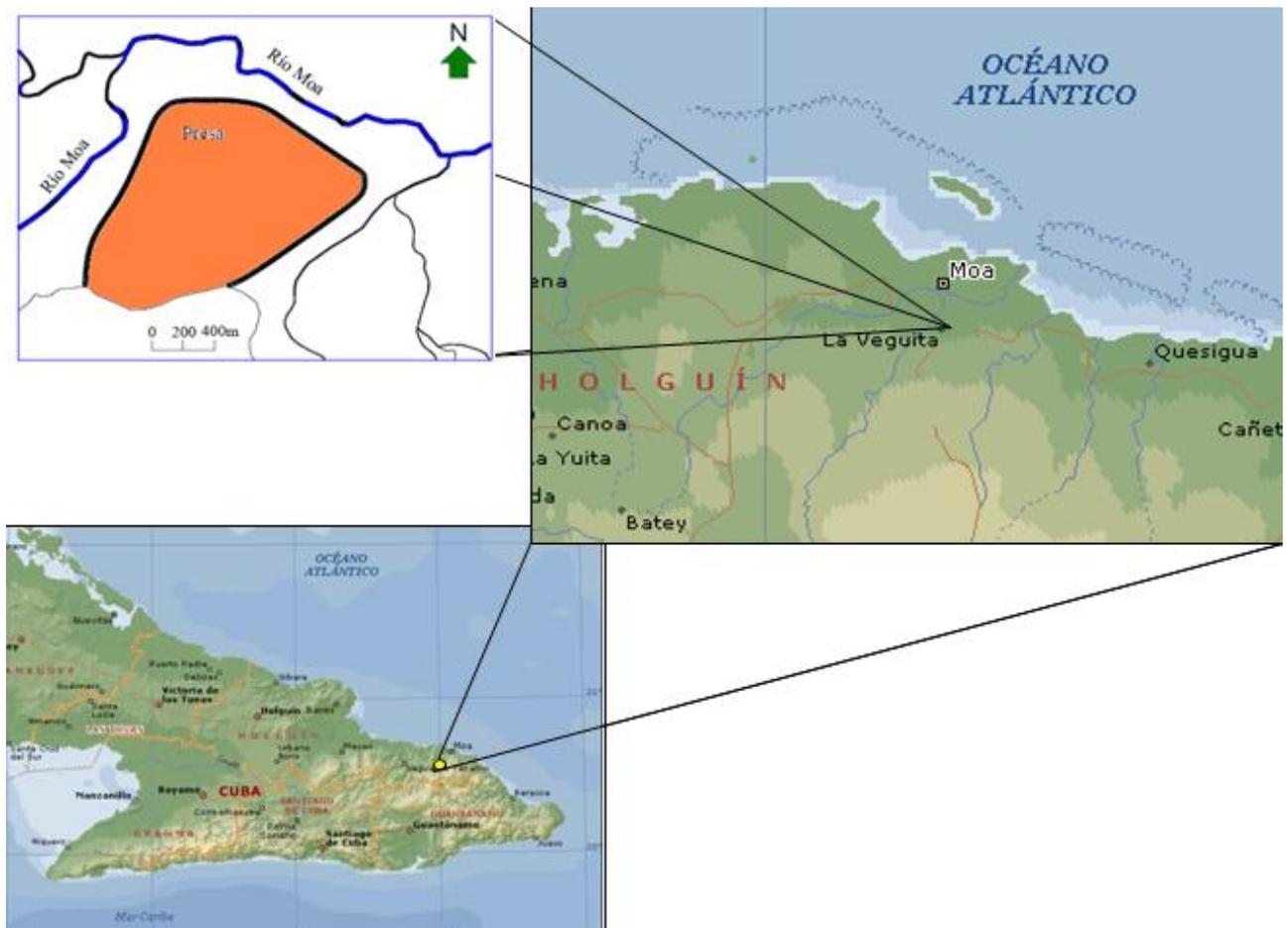
La agricultura y la ganadería ocupan un 2,4% y el 85 % son tierras forestales respecto a la superficie total. Se cosechan cultivos varios (granos, hortalizas y tubérculos) 34.2 %, café 22.1 % y frutales 20.3% .Las industrias más importantes son las procesadoras de níquel y de materiales de la construcción.

Su ubicación geográfica, exposición de los vientos y sus características geomorfológicas le imprimen, condiciones muy propias dentro del contexto climático de la provincia, estas condiciones se distinguen con claridad por las características pluviométricas muy exclusivas de este municipio e incluso dentro del mismo territorio existen variaciones por la diferencia de altitudes y zonas de barlovento y sotavento, cuestión esta que se refleja en las diferencias pluviométricas al comparar micro-estructuralmente territorios ubicados de forma opuesta geográficamente uno a otro. Se destacan sus valores naturales para la conservación de los ecosistemas e incluye una porción del Parque Nacional " Alejandro de Humboldt el que constituye el área protegida estricta (Categoría II UICN) Más importantes de Cuba en lo referente a biodiversidad, destacándose la misma no solo por poseer la mayor riqueza y endemismo de los ecosistemas montañosos conservados de Cuba. En el año 2001 este Parque fue declarado por la UNESCO como Sitio de Patrimonio Mundial, constituye además el núcleo de principal de la reserva de la Biosfera Cuchillas del Toa.

1.2- UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Geográficamente el área de estudio se encuentra al noreste de la planta procesadora de níquel “Pedro Soto Alba S.A.” en el municipio de Moa situado en la parte más oriental de la provincia de Holguín, limita al norte con el Océano Atlántico, al este y sur con la provincia de Guantánamo y al oeste con los municipios de Sagua de Tánamo y Frank País. (Figura 7)

Figura 7. Ubicación geográfica de la Presa de colas de la Empresa Pedro Soto Alba de Moa.



1.3 Condiciones ingeniero- geológicas que inciden en la estabilidad de las presas de colas

1.3.1- Clima

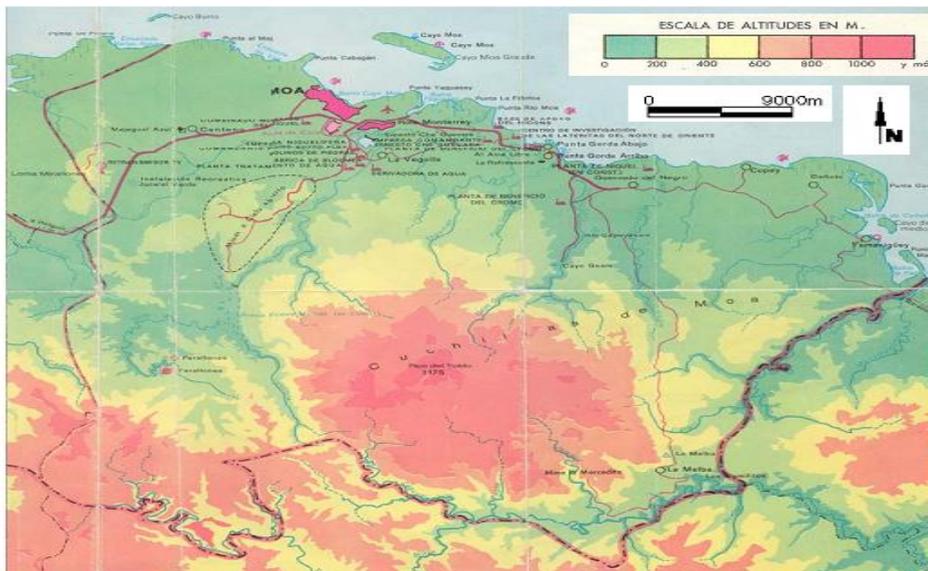
La ubicación geográfica, exposición de los vientos y características geomorfológicas le imprimen al municipio de Moa, condiciones muy propias dentro del contexto climático de la provincia de Holguín. El clima es tropical húmedo, siendo una de las áreas de mayor pluviometría del país.

El clima es uno de los factores externos que más contribuyen a la inestabilidad de los taludes, por el efecto que tiene la saturación del terreno, en el aumento del peso volumétrico del suelo y de manera más trascendente, en la reducción de la resistencia del esfuerzo cortante de los suelos (por efecto de la presión de poro); asimismo, las corrientes extraordinarias por el pie propician socavación, deslaves y cambios en la geometría de las laderas o taludes. La mayoría de los deslizamientos disparados por lluvias intensas y de larga duración se han presentado en laderas constituidas por suelos residuales y depósitos de origen sedimentario o aluvial. La lluvia por ejemplo produce un aumento en la saturación del terreno y en el aumento del peso de este y de manera más trascendente, en la elevación del nivel del agua, lo que se traduce en el incremento de su presión. El régimen de temperatura del aire es típico de zonas costeras de la región oriental con un valor medio anual superior a 26 C con máximas y mínimas absolutas anuales de 36 y 12 C respectivamente, los meses más cálidos son usualmente de junio a septiembre, lo que trae consigo que en este período haya una mayor evaporación del agua presentes en la colas, provocando el agrietamiento de las mismas y una mejor concentración del contenido de níquel presente en las aguas clarificadas de la presa, los meses más frescos son de diciembre para mayo lo que trae como consecuencia el aumento del contenido de agua, los altos niveles freáticos, la socavación, y rebocó de la presa producto a las intensas lluvias, además trae como consecuencia la erosión de los taludes producto al arrastre de materiales.

1.3.2 Relieve

Se caracteriza por un relieve escarpado donde el 6% de la superficie es de llanuras aluviales fundamentalmente y el 94 % montañas. Las instalaciones de la Empresa Moa Níquel S.A; se ubica fundamentalmente en una superficie inclinada, con dirección S-N y pendientes moderadas. La presa de cola se desarrolla en el valle aluvial del río Moa. Al Sur se desarrolla un relieve montañoso con macizos muy intemperizados y erosionados que están diseccionadas por los cauces de los ríos Moa, Cabaña y el arroyo Los Lirios, conformando la red de drenaje principal que tributa hacia el área de estudio. Además desde los inicios de la construcción de la presa de cola el relieve del área comienza a ser alterado en cada fase de construcción.

Figura 8. Mapa de altitudes del municipio minero de Moa (ICGC, 1986).



1.3.3 Geología

Geológicamente el territorio de Moa se caracteriza por su gran complejidad, debido a la superposición de eventos con edades y estilos diferentes, que directa o indirectamente intervienen en la génesis, desarrollo y conservación de los yacimientos ferroniquelíferos; dando origen al cinturón plegado, representado por la corteza oceánica del arco volcánico

cretácico, las cuencas superpuestas de primera y segunda generación y los sedimentos noeplatafórmico. La roca madre ultrabásica contiene piroxenos serpentinizados, peridotitas y dunitas del cretácico superior, las cuales han sufrido intemperización por diversas causas. Las lateritas ricas en níquel y cobalto están presentes en la superficie en varias de las áreas montañosas hacia el sur, algunas en explotación actualmente. (Anexo 1, mapa geológico de la región de Mba. (Rodríguez, 1998). De acuerdo a los informes ingenieros geológicos en cuanto a la litología local se localizan los siguientes tipos de suelos:

- Sedimentos de ríos que han sido depositados sobre la llanura costera y los sedimentos marinos, en base o pie de las montañas, formando una red complicada de sedimentos del periodo cuaternario.
- Arena gruesa en forma de vetas de origen coluvial.
- Deposito de grava, en forma de canales enterrados que se representan bajo la superficie, a menudo debajo de capas de arenas finas veteadas y cienos depositados durante las inundaciones de los ríos.
- Acumulaciones superficiales generalmente caracterizadas por arcillas y cienos depositados en un ambiente litoral o costero de pantanos con manglares.
- Arcillas marinas suaves y cienos con moderas a altos contenidos de arcillas orgánicas.

Todo lo expuesto hasta ahora sobre la litología del área de estudio, muestran que los suelos de la cimentación de la presa son débiles y exigen un detallado análisis de la estabilidad de la estructura, pues los factores o eventos que inciden en su mal comportamiento son; las fuertes lluvias, los elevados niveles freáticos, la falta de cobertura vegetal y los movimientos de la corteza terrestre.

De manera general podemos decir que en la literatura existen varios casos documentados sobre deslizamientos que han sido favorecidos por las condiciones estratigráficas y geológicas de los materiales que constituyen las laderas. Los planos de estratificación, las discontinuidades o las zonas de contacto de estructuras geológicas, se convierten con frecuencia en potenciales superficie de falla de una ladera o talud, principalmente cuando los

planos de estratificación y la zona de contacto adquieren pendientes inclinadas o francamente paralelas a las superficies de las laderas naturales.

Las investigaciones ingeniero-geológicas realizadas por la Knight Piésold Consulting entre 1997 y el 2007 reflejan que la presa de colas esta asentada sobre una mezcla interrelacionada de estratos consistentes en:

- Suelos suaves aluviales fluviales y colusiones sin consolidar con trazas de cieno orgánico
- Sedimentos marinos aluviales lacustres mezclados
- Serpentinitas o areniscas consolidadas

Desde sus inicios el depósito ha padecido de problemas relacionados con la baja capacidad portante de los suelos de cimentación. Los fenómenos encontrados han sido fallas locales en las laderas comprendidas en los sectores del N al E de la presa, desbordes y reboses de los perímetros del terraplén que ha traído como resultado deslaves, derrames y liberación de lodos o residuos al entorno.

1.3.5- Tectónica: Características tectónicas de la región

La tectónica de la región es sumamente compleja, estando representada por estructuras disyuntivas de diferentes tipos, magnitudes y edades, estructuras explicativas poco visibles, pero existentes y discordancias estructurales que permiten la división en pisos estructurales.

● Grietas

El procesamiento de las grietas de los alrededores de la ciudad de Moa, determinó 6 familias, correspondiendo 3 de ellas a las asociadas a los planos de cabalgamiento (rumbo NNW), con ángulos de buzamientos bajos a ligeramente altos, con grietas

cerradas o rellenas de milonita o brecha tectónica, siendo grietas de cizalla y uno de los sistemas más antiguos.

● Fallas

Según su orden las fallas principales son:

- ✓ Falla Sabana o La Española, de dirección WNW-ESE, es una falla ínter placas activa en la actualidad y foco de múltiples sismos.
- ✓ Falla Mba, de dirección NNE, es desplazada atrechos por fallas más jóvenes y de menor magnitud de dirección NW o NNW. El bloque al oeste de la falla se encuentra mucho más levantado que el bloque del este, donde el corte ofiolítico tiene su mayor potencia.
- ✓ Fallas Cabañas, de dirección NE, se considera una falla activa o reactivada, por lo que es sismo generadora y forma junto a las fallas Sabana y Mba, un nudo tectónico a unos 1,5Km al SE DE Cayo Grande de gran importancia sismológica. La falla Cabañas es más joven que las fallas Mba y Sabana respectivamente, pues al parecer corta a ambas en la zona del nudo antes mencionado.
- ✓ Falla Quesigua, de dirección NNE, puede tener tramos de dirección NS, es desplazada o cortada por sistemas de fallas menores de dirección NE-NW. Esta falla pudiera ser contemporánea con la falla Mba.

El cuarto sistema de fracturas que aparece en el territorio, corresponde a estructuras sublongitudinales que aparecen en toda el área pero que tienen su máxima expresión en las zonas periféricas de los sectores de máximo levantamiento, como por ejemplo las fallas a través de las cuales corren algunos tributarios como el arroyo La Veguita del río Mba, el arroyo La Vaca, lo cual permite considerar su origen a los procesos de descompresión o expansión de bloques al disminuir las tensiones que mantienen cohesionado los macizos rocosos debido a los movimientos verticales diferenciales, lo que justifica la ausencia de desplazamiento geológicos y geomorfológico apreciables. (Anexo 2: mapa morfotéctónico del territorio de Mba (Rodríguez, 1998).

1.3.6 Geomorfología

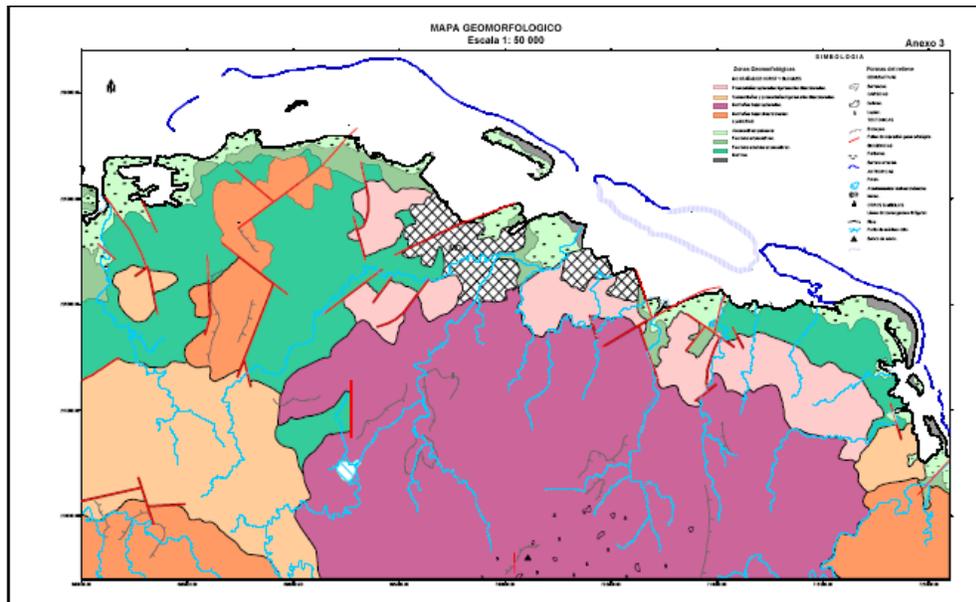
Desde el punto de vista morfogenético, la zona donde está enclavada la presa de colas se corresponde con una llanura aluvial, sobre el zócalo de antiguos macizos de rocas metamórficas (Lilienberg, 1973), originada por los ríos Moa, Cabaña y los Lirios, la cual transicional hacia una llanura fluvio-marina-deltaica hacia el norte cerca de la desembocadura (figura 1.4). La llanura es plana, bordeada por elevaciones a manera de anfiteatro, donde se manifiestan movimientos neotectónicos débiles, influenciada por el bloque tectónico Moa-Baracoa y con predominio de procesos acumulativos, donde se aprecian fuertes manifestaciones erosivas recientes, en sus graderías, a partir de las acciones antrópicas producto de la actividad minera.

La llanura del río Moa, debió ser una pequeña ensenada o bahía de bolsa de bajo fondo, durante las trasgresiones cuaternarias, donde se depositaron sedimentos terrígenos y marinos de forma alterna, en dependencia de los períodos climáticos predominantes. Los débiles ascensos neotectónicos, manifestados en el área de estudio, a partir del holoceno permitieron la configuración actual de la cuenca y el recubrimiento del relieve original por sedimentos aluviales friables. El río ha ido profundizando su cauce en busca de su nuevo perfil de equilibrio, dando lugar a la formación de terrazas aluviales, dispuestas en forma escalonada, que en la actualidad se encuentra totalmente enmascaradas por los depósitos de la presa de cola.

El área que ocupa la piscina Sur se desarrolla sobre el complejo de rocas ofiolíticas, fuertemente meteorizadas, que transicionan formando abruptas pendientes hacia la llanura aluvial del río Moa. Los rasgos geomorfológicos más importantes que se distinguen en este tipo de relieve, son las manifestaciones de procesos erosivos (formación de cárcavas) en las pendientes desprovistas de vegetación a consecuencia del laboreo minero. Es de destacar el valle encajado del río los Lirios, que desciende a través de estas pendientes hacia la confluencia con el río Moa del cual es afluente, sin embargo al llegar a la llanura su cauce fue desviado, por la necesidad de la construcción de la actual presa de cola., el curso artificial inferior del río, se ha ido colmatando de sedimento y no presenta un cauce definido, corriendo

de forma errática. Por lo cual en los períodos de lluvia intensas durante las crecidas del mismo se produce un desgarramiento o desprendimiento de los taludes lo cual da origen a la formación de grandes cárcavas, en ocasiones cuando esto sucede el talud tiende a fracturarse haciendo imposible el paso por el mismo posibilitando la inestabilidad del área dañada.

Figura 9. Mapa geomorfológico del territorio de Moa (Rodríguez, 1998).



1.3.7- Hidrogeología: (Superficial y subterránea)

La red hidrográfica del municipio de Moa es muy densa (según el trabajo de Batista, 1987) presenta una densidad con valores entre 1.5 y 2 Km. del río por kilómetro cuadrado, lo que es un indicativo de una importante escorrentía superficial y está caracterizada por una gran cantidad de ríos y arroyos permanentes durante todo el año.

Dentro de las corrientes fluviales en la región se destacan los ríos Los Lirios, Moa, cabaña, Punta Gorda, Yagrumaje, Quesigua, Cupey, Semillero, así como diferentes arroyos.

El drenaje natural superficial y subterráneo de los suelos que conforman la litología local, producto a las características físico mecánicas de los mismos, unido a las intensas

precipitaciones que ocurren en la zona en los períodos lluviosos, producen la erosión hídrica en sus tres tipos: Laminar, por surcos y en forma de cárcavas.

La presa de cola se localiza en el valle aluvial del río Moa, que la rodea en la parte W y N, por el este la bordea el arroyo Los Lirios. El aumento de los niveles en el cauce del río Moa por crecidas o avenidas grandes trae como consecuencia el represamiento de este debido al gran volumen de azolves, lo que hace retroceder los flujos del arroyo “Los Lirios” potenciando el efecto erosivo sobre los taludes aledaños al S de la presa de colas.

Esta configuración hidrográfica y el sistema de drenaje natural, propician que se mantengan altos los niveles freáticos y las presiones hidrostáticas, lo que disminuye las capacidades resistentes cortantes de los suelos de cimentación de la presa.

Es importante señalar que el acuífero freático formado a partir de la base de la presa está ubicado en la zona de lixiviación de las rocas del complejo ofiolítico (serpentinitas) y su profundidad de yacencia desde el suelo base varía desde 4.3 hasta 5.7 metros y desde el dique superior de 30.3 a 31.7 metros (en la actualidad). En el área se desarrolla un acuífero artificial artesiano dentro de la potencia de las colas depositadas, el cual tiene una profundidad de yacencia de 3.45 a 5.6 metros. Debido al carácter relativamente impermeable de este material el acuífero del complejo ofiolítico tiene un carácter artesiano y cuando se perforan los pozos ascienden los niveles hasta la altura del nivel del acuífero artificial.

1.4- Situaciones de riesgos naturales

1.4.1- Sismos

Podemos decir que los sismos ocupan un lugar dentro de las causas naturales o factores externos que activan o disparan la inestabilidad de los taludes o laderas. De acuerdo con una estadística mundial sobre deslizamientos más catastróficos ocurridos en el siglo XX (Schuster, 1996), el 36 % de ellos fueron disparados por acciones sísmicas, solo el 4 % fue por lluvias. Ello muestra la gran importancia que tienen los sismos como fuente detonadora

de deslizamientos. El efecto de las acciones sísmicas da como resultado una fuerza horizontal, a favor del deslizamiento que equivale a una fracción del peso de la masa potencialmente inestable. Así pues para que ocurra un deslizamiento durante un sismo, es suficiente que las fuerzas actuantes y resistentes en la potencial superficie de falla se igualen. Difícilmente pueda pensarse en algún sistema de alerta dada la ocurrencia casi inmediata de los deslizamientos ocasionados por sismos, ha menos que esté a cierta distancia y no obstante, la impacté. Solo cabe en los casos en que se distinga como un peligro la presencia de una ladera en función de la condición de materiales y geometría, evitar los asentamientos humanos y las obras de infraestructuras cerca del pie de la ladera. Deberá mantenerse una distancia prudente libre de edificaciones, o bien diseñar obras de retención o encauzamiento de los posibles flujos.

En la presa de cola la ocurrencia de un sismo puede traer como consecuencia el deslizamiento de un talud producto al movimiento de masas. Por lo cual es necesario tener conocimiento de cuales son las partes más inestables de la presa para establecer medidas correctoras y evitar la ocurrencia de este tipo de fenómenos. Además al construir una presa debe considerarse la sismicidad del área y la proximidad a fallas potencialmente activas. Si existe el riesgo sísmico deberá evaluarse el comportamiento dinámico de la presa y el riesgo de rotura por licuefacción.

1.4.2- Inundaciones

Es un fenómeno natural que se produce por las intensas lluvias la cual trae como consecuencia el desbordamiento de las colas provocando una rotura del dique por el cual se va arrastrando gran cantidad de sedimentos y de esta forma contaminando los suelos y acuíferos.

El arroyo Los Lirios durante las lluvias prolongadas e intensas aumenta su cauce produciéndose una crecida o avenida lo cual trae como consecuencia el arrastre de gran parte del material con el que ha sido conformado el talud dejando al mismo muy inestable.

1.5- Condiciones ambientales y socioeconómicas existentes en la presa de colas.

Condiciones ambientales

- 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.
- 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
- Destrucción de la flora terrestre y acuática.

Condiciones socioeconómicas

- Aparición de nuevas posibilidades de empleo para los pobladores.
- Creación de un nuevo paisaje.
- Rehabilitación de áreas minadas

Capítulo II Metodología de la investigación. Descripción de los métodos usados.

Análisis estadístico

2.1-Introducción

El presente capítulo contiene la metodología aplicada en la investigación para el análisis geotécnico de la presa de colas con el objetivo de evaluar la estabilidad y el comportamiento de la misma.

Para cumplimentar esta tarea planteada se emplea una metodología integral de investigación que consta de trabajos analíticos y experimentales.

2.2- Metodología de la investigación

Análisis bibliográfico.

Se realizaron búsquedas de información y se consultaron documentos inéditos concernientes a dos proyectos efectuados en la empresa por (Geocuba). Se revisaron libros, revistas, trabajos de maestría y doctorado, además de una enorme búsqueda en internet.

Para la ejecución de esta investigación se sugirieron tres etapas fundamentales, que se describen a continuación:

Primera etapa. (Preparatoria)

En esta etapa fue seleccionada el área donde se iban a desarrollar los trabajos .El área total abarca una superficie 183 hectáreas, posteriormente se procedió a la búsqueda y revisión bibliográfica de los trabajos precedentes relacionados con la temática; tanto en el mundo como en nuestro país. Además se analizaron algunas generalidades sobre presas de colas, para conocer las características que presentan estas obras ingenieriles para el conocimiento de la humanidad.

Segunda etapa: Trabajos de campo.

El objetivo fundamental de esta etapa fue realizar marchas de reconocimiento en el área de estudio dirigidas a la descripción de las condiciones geólogo-geotécnicas de los taludes de la presa. También se realiza la parte experimental, de la investigación que permitió obtener los datos necesarios, para la caracterización geotécnica. Incluyo los siguientes aspectos:

1. Estudio y evaluación de las condiciones ingeniero geológicas presentes en los taludes de la presa y áreas cercanas.
2. Con el empleo de métodos de laboratorios se realizó la determinación complementaria de las propiedades físico-mecánicas de los suelos que conforman los taludes.
3. Se determinan las principales causas y condiciones que provocan la inestabilidad de los taludes.
4. Evaluación de la estabilidad de los materiales que conforman los taludes. Este estudio se realizó por estacionados, analizando cada uno de forma diferenciada de acuerdo a su comportamiento y estado.

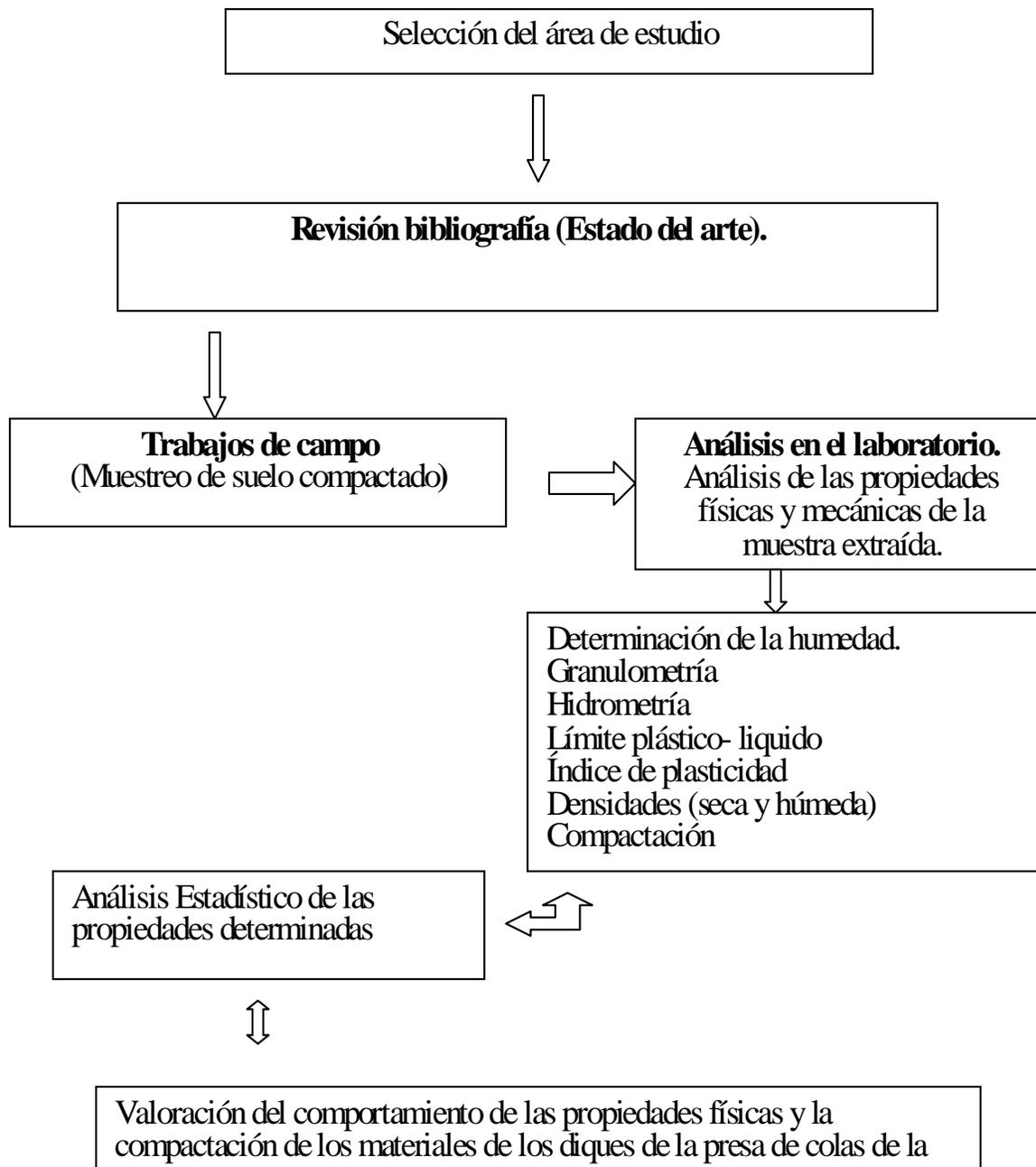
En esta segunda etapa se confecciona una base de datos para las diferentes propiedades físico-mecánicas presentes en cada estacionado por años.

Tercera etapa: Gabinete.

En esta etapa se procedió a la interpretación y procesamiento de la información realizando la evaluación de cada propiedad física- mecánica, lo que permitió efectuar su caracterización geotécnica. Sobre la base de lo cual se obtienen gráficos que representan el comportamiento de las diferentes propiedades determinadas en cada uno de los estacionados analizados.

De forma resumida se muestra en la (figura 11) las etapas y métodos empleados en la investigación:

Figura 10. Esquema de la metodología de la investigación.



2.3. Descripción y empleo de los métodos de trabajo

2.3.1 MUESTREO DE UN SUELO

Muestreo: 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.

Muestras alteradas, son aquellas que están constituidas por el material disgregado o fragmentado, en las que no se toman precauciones especiales para conservar las características de estructura y humedad; no obstante, en algunas ocasiones conviene conocer el contenido de agua original del suelo, para lo cual las muestras se envasan y transportan en forma adecuada.

Las muestras alteradas, de suelos podrán obtenerse de una excavación, de un frente, ya sea de corte o de banco o bien, de perforaciones llevadas a profundidad con herramientas especiales. Las muestras deberán ser representativas de cada capa que se atraviere, hasta llegar a una profundidad que puede corresponder al nivel mas bajo de explotación, al nivel de aguas freáticas o aquél al cual sea necesario extender el estudio.

Equipos:

Cinzel, Tanqueta

Martillo Cuchara

2.3.2 Extracción de la muestra

Primeramente llegamos a donde se realizó la compactación, selecciona el lugar teniendo en cuenta que la zona sea a nivel colocamos el anillo en la plataforma que fue compactada, encima del anillo se le coloca una bolsa de nailon de forma tal que no entre agua al terreno

seleccionado, se vierte el agua dentro del anillo hasta rebozar el mismo sin que se derrame agua afuera, se anota la cantidad de agua que se hecho en el anillo (volumen de anillo (ml)) luego se retira el nailon con el agua y se procede a extraer el material de la siguiente forma :

1 -se habré un hueco en el centro del anillo con aproximadamente 25 cm de diámetro por 25 cm. de profundidad de forma tal que las paredes del mismo queden rectas. El material extraído del hueco se deposita en un envase al cual se le conoce su peso (peso del cubo (g)) tratando de no perder ninguna partícula del material y conservando su humedad.

2- Se vuelve a colocar el nailon en el hueco y el anillo y se le hecha agua anotando la cantidad utilizada (Volumen del hoyo y el anillo) en (ml).Anotamos ese dato y se procede a llevar la muestra para el laboratorio.

Luego de llevar la muestra para el laboratorio se procede a pesar la tanqueta con la muestra se anota el (peso del cubo y el suelo (g)).

*Se determina el volumen del hoyo con la siguiente formula:

$$\text{Volumen.del.hoyo} = \text{volumen.del.hoyo.y.el.anillo} - \text{el.volumen.del.anillo.}$$

*Determinar el peso del suelo por la siguiente formula:

$$\text{Peso del suelo} = \text{peso del cubo y suelo} - \text{peso del cubo}$$

* Se determina la *densidad húmeda del suelo* = $\frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} * 1000$

Se determina el % de compactación predeterminado con humedad y densidad máxima asumida de acuerdo con las características del material

$$\%.de.compactación = \frac{\text{Densidad.seca}}{\text{Densidad.máxima}} * 100$$

Escogemos tres muestras de la tanqueta para determinar el % de humedad, se pesa cada muestra y se pone a secar de 16 a 24 horas y se realizan los cálculos según el modelo.

2.3.3 CONTENIDO DE AGUA EN SUELO

Objetivo:

- a) Determinar la cantidad de agua que posee una muestra de suelo, con respecto al peso seco de la muestra.
- b) Determinar este contenido de agua con los 2 métodos: Rápido y Estándar.

Definición:

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

Fórmula:

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Método Estándar

Equipo y material que se utiliza:

- Horno eléctrico, que mantenga la temperatura constante a 105 grados Centígrados.
- Balanza con aproximación al 0.1 gr.
- Charola y cápsula de aluminio
- cuchara

Procedimiento:

1. Se anota el número de la charola y se pesa, anotándola como tara (T).
Se vacía suelo húmedo a la charola y se pesa, anotándola como tara + suelo húmedo (T + Sh).

3. Se pone a secar el suelo en la estufa, moviéndolo algunas veces para que sea mas rápido el secado, se coloca encima el cristal de reloj para comprobar que el suelo ya no tenga humedad; esto ocurrirá cuando ya no empañe el cristal.
4. Posteriormente, se deja enfriar (charola y suelo)
5. Se procede a pesar, lo que seria charola + suelo seco (T + S's)
6. Y se realizan los cálculos para determinar el contenido de agua por el método rápido

Para el método estándar:

1. Se hace lo mismo que en el método anterior, con la diferencia que en este método se utiliza una cápsula, el suelo húmedo es secado al horno a una temperatura de 100-110°C, durante 24 hrs.
2. Cuando se cumple con todo lo anterior, el suelo es sacado del horno, se deja enfriar y se pesa, aplicándose la fórmula anterior para determinar el contenido de agua.

2.3.4 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (GRANULOMETRÍA)

Método Mecánico

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)

Definición

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

Aplicación

Para el análisis granulométrico de los suelos gruesos y los suelos finos se tienen en cuenta las siguientes aplicaciones:

Suelos gruesos

- a) Se Pueden 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.

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.

Equipo y material que se utiliza:

- Juego de mallas (comúnmente se utilizan: 3", 2", 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No.4, No.10, No.20, No.40, No.60, No.100, No.200 y la Charola).
- Cucharón.
- Balanza con aproximación a 0.1gr.
- Charolas rectangulares de 40X60 cms.
- Malla No. 200, para el lavado del suelo que pasó la malla No. 4
- Horno o estufa.
- Charolas de aluminio.
- Vaso de aluminio.
- Agua.
- Suelos en estudio.

Procedimiento

La muestra que no paso por el tamiz 200 se saca del horno.

1. Colocamos el tamizador en la posición de trabajo.
2. Se coloca el tamiz (modelo).
3. Se pesa la muestra después de sacado del horno se anota.
4. Se procede al tamizado.
5. Se determina el peso del vaso de Ni (anotamos).
6. Se determina el peso y se llena el modelo.
7. Se determina el peso del material de cada tamiz añadiéndolo al vaso de Ni.
8. Procedemos a llenar el modelo.

2.3.5 LÍMITES DE CONSISTENCIA

Objetivo

Determinar los Límites: Líquido, Plástico, también obtener la prueba de Contracción lineal; esta última tiene aplicación en los estudio de materiales que se utilizan en las capas del pavimento.

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

Definiciones:

Límite Líquido (LL).- Es la frontera comprendida entre los estados Semi-líquido y Plástico, definiéndose como el contenido de humedad que requiere un suelo previamente remoldeado, en el que al darle una forma trapezoidal sus taludes fallen simultáneamente, cerrándose la ranura longitudinalmente 13mm., sin resbalar sus apoyos, al sufrir el impacto de 25 golpes consecutivos, con una frecuencia de 2 golpes por segundo, en la Copa de Casagrande, teniendo una altura de caída de 1 cm.

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

Límite Plástico (LP).-Es la frontera comprendida entre el estado plástico y semi-sólido. Se define como el contenido de humedad que posee un cilindro de material en estudio de 11 cms. de longitud y 3.2mm de diámetro (formado al girarlo o rotarlo con la palma de la mano sobre una superficie lisa) al presentar agrietamientos en su estructura.

Equipo y material que se utiliza

- Copa de Casagrande.
- Ranurador laminar o ranurador curvo.
- Cápsula de porcelana.
- Espátula.
- Charolas de aluminio o vidrio de reloj.
- Malla No. 40.
- Horno con temperatura constante de 105°C .
- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Alambre con un diámetro de 3.2 mm.
- Agua.

Procedimiento:

1. El suelo debe ser cribado por la malla No. 40, el cual se vacía en una cápsula de porcelana y debe humedecerse 24 hrs. antes de estas determinaciones.
2. Se pesan las charolas de aluminio (4 para el LL y 2 para el LP)
3. Para el Límite Líquido, el suelo es mezclado en la cápsula de porcelana, hasta que se vea una mezcla manejable, se coloca en la Copa de Casagrande, distribuyendo el material del centro hacia los extremos, de tal manera que en el centro quede una superficie a nivel.
4. Se hace una ranura en la parte media del suelo, utilizando el ranurador, de tal forma que este vaya perpendicular a la Copa de Casagrande.

5. Se procede a darle los golpes en la Copa, con una frecuencia de 2 golpes por segundo, hasta que los taludes del material se unan en una longitud de 13 mm., los golpes son contados y son registrados en la columna de Número de golpes.

Debe tratarse de que esta condición, antes descrita se cumpla entre 4 y 40 golpes, para que la prueba se tome como bien ejecutada; se recomienda que esta condición se logre una vez en cada uno de los siguientes intervalos de golpes:

Una vez entre 30 y 40 golpes,

Otra entre 20 y 30 “

Otra entre 10 y 20 “

Otra entre 4 y 10 “

Lo anterior es recomendado con el fin de que los puntos obtenidos al graficar, el número de golpes contra contenido de agua, estos queden separados unos de otros y se pueda definir con mayor claridad la Curva de Fluidez.

En cada una de estos ensayos se toman muestra del centro de la Copa, las cuales son pesadas y se anotan en el registro como: tara + suelo húmedo.

6. Estas muestras son introducidas al horno para determinar el contenido de humedad en cada ensaye.
7. Cuando el suelo tenga la humedad correspondiente al LL (ensaye en el intervalo de 20 a 30 golpes), se llena el molde rectangular, en 3 capas, dándole los suficientes golpes a cada capa contra la mesa, con el fin de extraerle el aire atrapado, después el molde se enrasa, se limpia exteriormente con una franela húmeda y finalmente se pesa.

Para la determinación del Límite Plástico (LP) de la muestra menos húmeda, pero que sea moldeable, se hace primeramente una esfera de 1.5 cm aproximadamente, se gira o se rota con la palma de la mano o sobre la placa de vidrio tratando de hacer un cilindro alargado y con un diámetro de 3.2 mm. Si este cilindro presenta agrietamientos múltiples se dice que el suelo presenta el Límite plástico, donde se obtendrán muestras de suelo y se someterán al

secado para determinar el contenido de agua, el cual equivale al LP. En caso de no cumplirse la anterior condición el suelo se hará de nuevo una esfera y se repetirá el proceso hasta que se cumpla lo especificado.

Cálculos

Para el Límite Líquido, las muestras son sacadas del horno, se dejan enfriar y se pesan, se registran en la columna de: tara + suelo seco.

Con estos datos se obtiene el contenido de agua en los 4 ensayos, se grafican:

Número de golpes contra contenido de agua, obteniéndose 4 puntos, por los cuales se traza una línea recta por los puntos o parte intermedia de ellos, a esta recta se le llama Curva de Fluidez; en 25 golpes, subimos e interceptamos la Curva de Fluidez y de ahí con la horizontal, leemos ese contenido de humedad, la que corresponderá al Límite Líquido.

Para el Límite Plástico, se procede a obtener el contenido de agua correspondiente, estos 2 contenidos de agua se promediarán siempre y cuando no haya una diferencia mayor a 2 puntos porcentuales, en caso contrario se tendrá que repetir esta prueba. El promedio antes descrito, se reportará como el resultado de Límite Plástico.

Para obtener el Índice Plástico (I_p) = $LL - LP$

2.3.6- CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Objetivo

Trabajar una muestra de suelo por equipo y realizar las pruebas de Granulometría y Límites de consistencia, para poder clasificar un suelo de acuerdo al Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S). (Ver Anexo 3)

2.3.7- PRUEBA PROCTOR ESTÁNDAR

Objetivo

Determinar el peso volumétrico seco máximo.)(γ_d Máx y la humedad óptima del suelo en estudio.(W ópt) Esta prueba es recomendada a suelos arcillosos que pasan la malla No. 4.

Equipo y material que se utiliza:

- Compactador automático
- Molde de compactación de 0.94 lts. y su extensión
- Pisón de un peso de 2.5 Kg.
- Charola rectangular de 40X60 cms.
- Cápsulas de aluminio
- Horno
- Balanza con aproximación a 0.1 gr.
- Probeta con capacidad de 100 ml.
- Malla No. 4
- Regla o solera para enrasar
- Vaso de aluminio
- Agua
- Brocha
- Estopa para limpieza del molde
- Suelo arcilloso que pasa la malla No. 4

Procedimiento

1. Se pesan las cápsulas de aluminio y el molde de compactación, anotando estos datos en el registro correspondiente.

2. Se prepara una muestra de 3 Kg. de suelo secado al sol, se le incorpora la cantidad de agua suficiente para tenga de un 4 a un 6% abajo de la humedad óptima, se uniformiza la humedad, se vacía suelo húmedo a la primera cápsula de aluminio que se haya pesado, hasta completar las $\frac{3}{4}$ partes de su capacidad, la cual se pesa y se registra como:
 - 1) (Peso de cápsula + suelo húmedo)
 - 2) Las cápsulas se introducen al horno; esto es con el fin de determinar el contenido de agua para este ensaye.
3. Con el material restante, llenamos el molde, compactándolo en 3 capas aproximadamente iguales, dándole 25 golpes a cada una de estas. Después de que se haya compactado en suelo, la última capa no debe salir del molde mas de 2.5 cms.
4. Se enrasa el molde y se pesa, registrándolo como: Peso del molde + suelo húmedo.
5. Se saca el material del molde, se reintegra al resto del material que se encuentra en la charola, se disgrega hasta dejarlo como estaba inicialmente.
6. Se le hace el incremento de agua recomendado, que es de un 2% con respecto al peso inicial de la muestra (3,000 grs.); por lo que la cantidad de agua a agregar es:
 - 1) Cantidad de agua = $3,000 \times 0.02 = 60$ grs. de agua ó 60 ml.
7. Se distribuye la humedad en forma homogénea y se repite la compactación como se describió anteriormente; se compacta las veces necesarias hasta que el peso del molde + suelo húmedo de un valor igual o menor que el inmediato anterior.
8. Es recomendable que esta prueba se logre en un mínimo de 4 ensayes y un máximo de 6, con el fin que se logre definir la parábola de forma completa.

9. Después de 24 hrs. las cápsulas son extraídas del horno y se pesan, registrándolas como:
- 1) Peso de cápsula + suelo seco

10. Se obtienen los cálculos del registro de la siguiente forma:

- 1) Peso del suelo húmedo en (W_m) = (Peso del molde + suelo húmedo) – (peso del molde)

- 2) Peso volumétrico húmedo en kg/m^3 ; $\gamma_m = \frac{W_m}{V}$; donde: V = volumen del molde, en m^3 .

- 3) Peso del agua (W_w) = (Peso de cápsula + suelo seco) – (Peso de la capsula + suelo seco).

- 4) Peso del suelo seco (W_s) = (Peso de la cápsula + suelo seco) – (peso de la cápsula).

- 5) Contenido de agua $\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100$

- 6) Pesos volumétricos secos (γ_d) = $\frac{\gamma_m}{1 + \frac{\omega}{100}}$

11. Se grafican los 2 últimos renglones del registro, de la siguiente forma:

- 1) En el eje de las abscisas se indican los contenidos de agua (ω) en % y en el eje de las ordenadas los pesos volumétricos secos (γ_d).
- 2) En el punto más alto de la parábola, con la horizontal se obtiene el peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$) y con la vertical se obtiene la humedad óptima ($\omega_{\text{ópt}}$).

2.4- ANALISIS ESTADÍSTICO:

Análisis estadístico de las propiedades físico-mecánicas determinadas para esta investigación, inicialmente se consideran todas las propiedades determinadas en el campo, luego se compararon con las obtenidas en el laboratorio, obteniendo resultados muy significativos, los cuales se muestran en las tablas (Ver Anexos 4,5,6,7,8 y 9). Luego

procedimos a graficar para analizar el comportamiento de las diferentes propiedades, a partir del promedio de cada una de ellas de manera general.

Años	LL	LP	IP
2007	43.7	34.2	9.5
2008	39.5	30.3	9.2
2009	41.4	16.2	25.2
2010	43.1	34.0	9.1

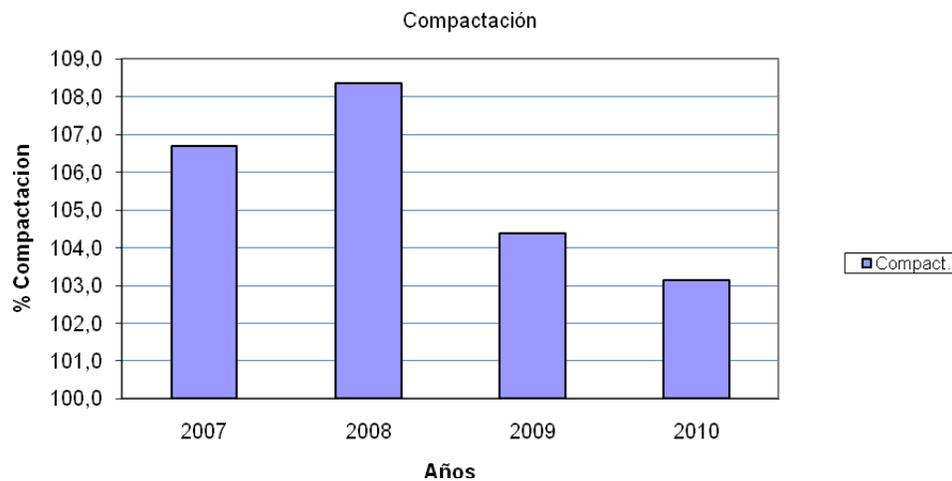
Tabla 1 promedio de limites por años.

Tabla 2 promedio de compactación, humedad y densidad seca.

Años	Comp.	Hum	Dseca
2007	106.7	22.8	1869.0
2008	108.4	22.1	1938.2
2009	104.4	23.5	1910.1
2010	103.2	24.5	1882.5

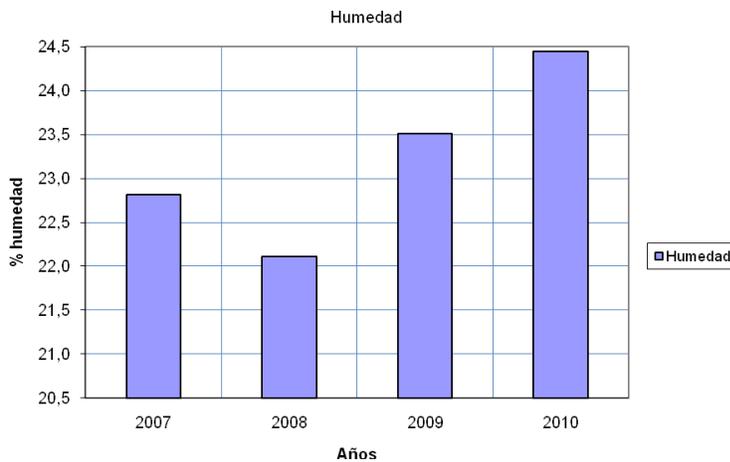
En la Figura 11 podemos observar el gráfico del comportamiento de la compactación a medida que transcurren los años, esto está en correspondencia de los materiales usados para la construcción del dique, en el cual en los últimos años la compactación ha ido disminuyendo ya que el material proveniente de la zona de préstamo para la confección de los diques no tiene las mismas características que en años anteriores. El rango de compactación entre estos años osciló entre 103 hasta 108 % aproximadamente, por lo cual se cumplió con las normas establecidas para la fabricación de diques.

Figura 11. Gráfico # 1. Comportamiento de la compactación.



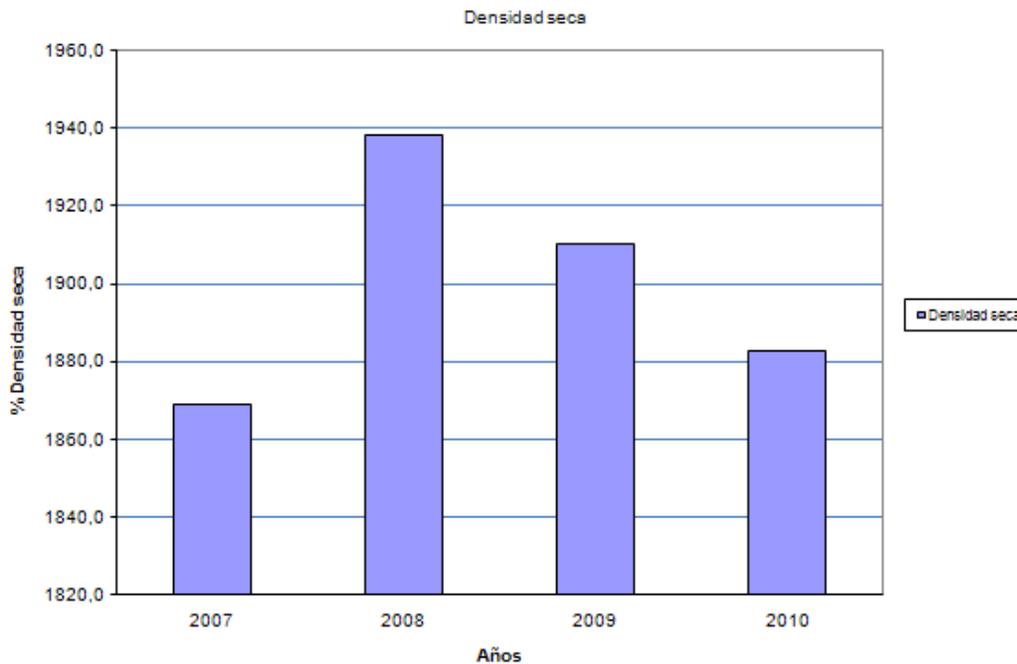
En la Figura 12, se muestra el gráfico # 2 que ilustra el comportamiento de la humedad de los últimos cuatro años de uso de la presa de colas, este indicador ha oscilado entre los 22 y 24 % respectivamente, tomando su valor máximo en el año 2010 que alcanzó hasta un 24,5 % producto de que este ha sido un año bastante lluvioso, a consecuencia de esta elevada humedad la compactación es más baja y hay que darle más tratamiento al material empleado para la confección de los diques.

Figura 12. Gráfico # 2. Comportamiento de la humedad.



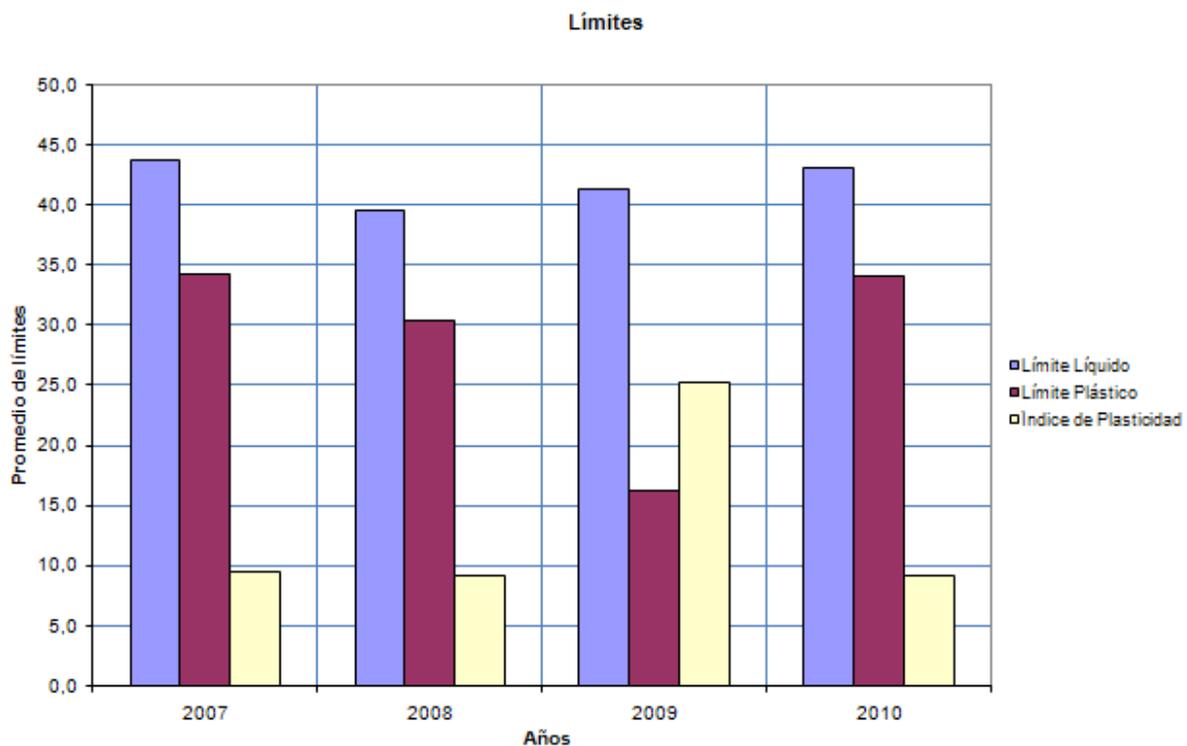
En la Figura 13 gráfico # 3, el comportamiento de la densidad seca en los cuatro años analizados alcanzó su nivel máximo en el 2008 y a medida que pasan el 2009 y 2010 fue decreciendo a consecuencia de que la humedad fue aumentando, si comparamos el gráfico de la compactación y el de la densidad nos daremos cuenta que cuando tenemos densidad alta la compactación aumenta también.

Figura 13. Grafico # 3. Comportamiento de la densidad seca.



En la Figura 14 gráfico # 4, muestra el comportamiento de los diferentes límites determinados en el laboratorio por años, observando que el límite líquido tiene un comportamiento no muy variable, a diferencia del límite plástico que disminuye grandemente en el año 2009 trayendo consigo un aumento del índice de plasticidad lo cual trae consecuencias muy catastróficas para la presa ya que la permeabilidad decrece, la tenacidad crece al igual que la resistencia al estado seco.

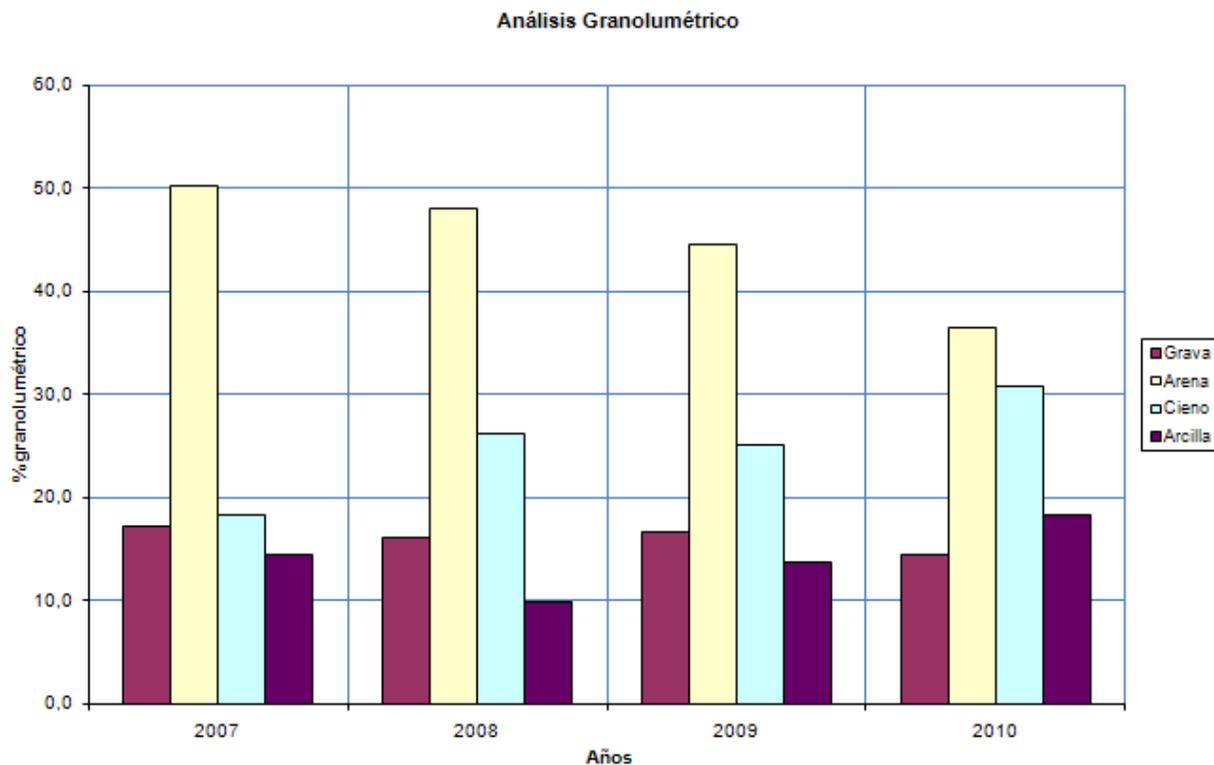
Figura 14, Gráfico # 4. Comportamiento de los límites de consistencia de los materiales.



En la Figura 15 gráfico # 5, se muestra el comportamiento granulométrico general presente en la presa de cola en donde la granulometría es muy fina, con un contenido elevado de arena entre un 30-50%, cieno 20-40% y arcilla 10-20 %, y en menor

predominio las gravas convirtiéndose en un suelo areno-limoso-arcilloso. En la cual podemos resaltar que en el año 2008 las gravas alcanzaron un % mayor que las arcillas con respecto a los años analizados, y en el 2010 el % de cieno supera el contenido de arena.

Figura 15, Gráfico # 5 .Comportamiento de la granulométrico.



Como resultado de estos análisis de laboratorio podemos determinar el comportamiento geotécnico que presentan los taludes de la presa de manera general. Estos análisis muestran que los suelos de la cimentación de la presa son débiles y exigen un detallado

análisis de estabilidad de la estructura, pues los factores que inciden en su mal comportamiento son: elevados niveles freáticos, fuertes lluvias y podemos decir además que no existe una caracterización de los materiales obtenidos de las diferentes áreas de préstamo, por lo cual al estos suelos presentar características desconocidas como por ejemplo abundante contenido de materia orgánica, provoca una disminución de la compactación de los taludes por la alta humedad que presenta y esto incide negativamente en las propiedades físico -mecánicas presentes en el área trayendo como consecuencia la inestabilidad de la estructura.

Capítulo III. Interpretación de los resultados.

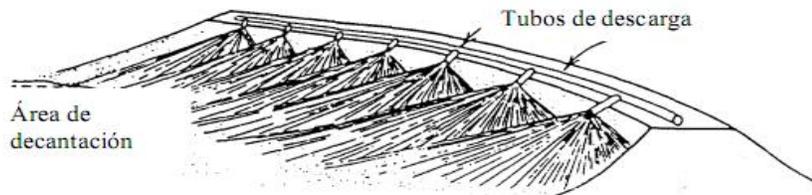
Comportamiento de las propiedades físicas y compactación de los materiales de la presas de colas de la empresa Pedro Soto Alba.

III.1 INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista geotécnico la presa de colas actual ha padecido de problemas relacionados con la baja capacidad portante de los suelos de cimentación por ello los problemas encontrados han sido: fallas de las laderas al N por deslaves y reboses de los perímetros del terraplén que ha traído como resultado derrames y liberación de colas al medio.

La operación de la presa de colas consiste en la transportación de una pulpa procedente de la planta de lavado a contracorriente, donde los residuales sólidos son mezclados con agua y transportados por una tubería a la presa de colas (figura 16) , con una presión de unos 10,55 kg/cm² a una temperatura de 38^oc, que es depositada planificadamente en el embalse a través de 12 spigots situados cada 25 metros, para posibilitar un crecimiento uniforme del cuerpo de la presa, además las aguas de retorno de la presa utilizan una tubería y circulan a la misma presión y temperatura que las colas.

Figura 16, Esquema de descarga de colas en la presa de la Fábrica PSA. (Modificado de Vick, 1996).



El resultado de investigaciones geotécnicas históricas y recientes muestra que las débiles cimentaciones en el lado NE están compuestas por arcillas marinas y orgánicas en estados suaves a firmes además de cienos. Estas funciones suaves restringen el desarrollo o crecimiento de la presa, que requerirán de significativas etapas en el crecimiento aguas arriba con la construcción de banquetas de refuerzos, consiste en conformar grandes plataformas con dimensiones variables que dependen del grado de inestabilidad que pueden alcanzar esa zona durante el proceso de recrecimiento de los diques. Esto muestra que los suelos de la cimentación de la presa son débiles y exigen un detallado análisis de estabilidad de la estructura, pues los factores o eventos que inciden en su mal comportamiento son: elevados niveles freáticos, fuertes lluvias, falta de cobertura vegetal y movimiento de la corteza terrestre, infiltraciones en los diques perimetrales, incorrectas operaciones en la deposición de la cola, espejos de agua concentradas en zonas inadecuadas (contra los diques perimetrales).

El análisis de las propiedades geotécnicas en la presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba nos indica que son variables en dependencia del material, las condicionales del minado por lo que su comportamiento es muy diferente a otros tipos de materiales de la zona.

III.2 Valoración de las propiedades físicas y compactación de los materiales que conforman los diques de la Presa de Colas

La evaluación de las propiedades físico mecánica de los suelos de la presa de colas envuelve una continua investigación que va desde su diseño, construcción, explotación, cierre y abandono. Esto involucra, la evaluación de la situación actual del embalse, del material de relaves mineros, y ejecutar todo un conjunto de acciones que aseguren una adecuada estabilidad a largo plazo ante las cargas estáticas y sísmicas. Los principales riesgos que se pueden presentar en estas etapas y muy especialmente en las de cierre y abandono son los relacionados con la generación de un escenario de inestabilidad de taludes, licuación o remoción de masa producto de la acción de un evento sísmico. Otro riesgo potencial de falla es el fenómeno de rebose o vaciamiento del material embalsado. Los factores que condicionan la generación de fallo son la altura del talud y ancho de coronamiento del muro de la cortina.

Para este análisis escogimos la parte más inestable de la presa en estos momentos, según los estudios ingeniero geológicos realizados es la parte N-E, en esta área realizamos la toma de muestra por estacionado (Tabla 3).

Tabla 3, Estacionados analizado por cada año en la parte NE, la parte más inestable de la presa en estos momentos.

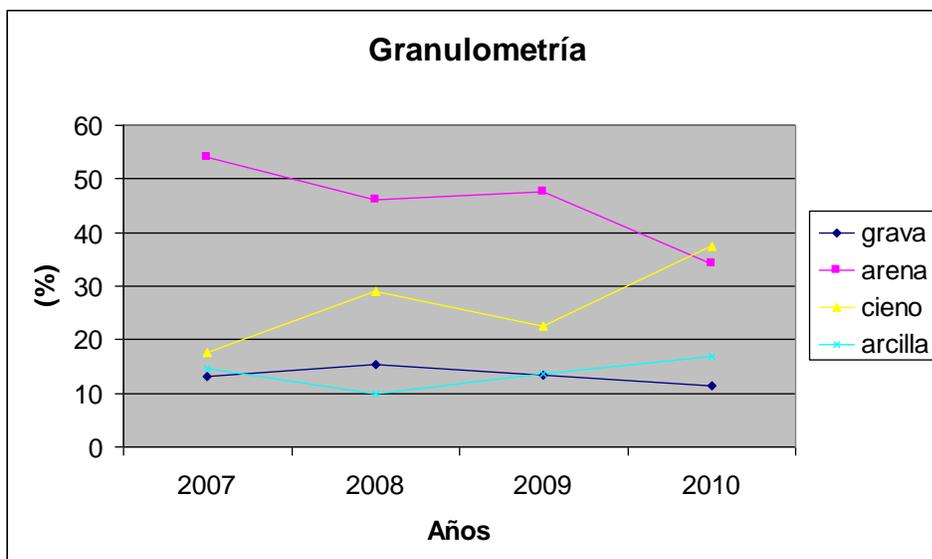
2007	2008	2009	2010
Estacionado 123+50	Estacionado 114+50	Estacionado 116+00	Estacionado 113+50
Estacionado 120+50	Estacionado 117+50	Estacionado 119+00	
Estacionado 125+50	Estacionado 116+50	Estacionado 123+50	
Estacionado 125+50	Estacionado 127+50	Estacionado 121+75	
	Estacionado 129+00	Estacionado 128+75	
	Estacionado 120+00		
	Estacionado 127+00		

3.2.1- GRANULOMETRIA

En el análisis de la estabilidad de las presas de colas debemos de evaluar los suelos que sirven para la construcción de la cortina de la presa y de las colas que son depositadas en el estanque o vaso de esta.

El análisis granulométrico de los materiales que componen las presas de colas esta condicionado al tipo de suelo por lo general se presentan con un predominio de fracciones de grano muy fino a fino (0,02-0,5), más del 50 % de las fracciones pasan por el tamiz 200. El análisis de las propiedades geotécnicas en los taludes de la presa de colas de la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba, nos indica que son variables en dependencia del material y las condicionales del minado, por lo que su comportamiento es muy diferente a otros tipos de materiales de la zona. La granulometría es muy fina, con un contenido elevado de arena entre un 30-60%, cieno 20-40% y arcilla 10-20 %, y en menor predominio las gravas convirtiéndose en un suelo areno-limoso-arcilloso como se muestra en el gráfico 6 de la figura 17. En la cual podemos resaltar que en el año 2008 las gravas alcanzaron un % mayor que las arcillas con respecto a los años analizados, y en el 2010 el % de cieno supera el contenido de arena.

Figura 17, Gráfico 6 Comportamiento granulométrico por años.



En el contenido granulométrico de estos suelos es típico el contenido de fracciones arenolimosas lo que supera la totalidad de las arcillas. El contenido de fracciones arcillosas puede variar y aumentar el %,

Contenido de arcilla (A)

$$A = \frac{I_p}{\% \text{arcilla}}$$

Donde: I_p es Índice de plasticidad

Años	IP	%arcilla	Cont. Arcilla
2007	9.5	14.6	0.65
2008	8.7	9.84	0.88
2009	21.7	13.6	1.60
2010	7.4	16.9	0.44

Según el contenido de arcilla y teniendo en cuenta los tipos de minerales de arcillas existentes podemos afirmar que en los años analizados tenemos por ejemplo:

- 2007 Arcillas caoliniticas baja.
- 2008 Arcilla caolinitica baja.
- 2009 Arcilla illita media
- 2010 Arcilla caolinitica baja.

Por lo cual podemos afirmar que hay un mayor predominio de las arcillas de tipo caolinítica en el material empleado del área de préstamo para la conformación de los taludes.

Los suelos que conforman los taludes poseen una característica singular debido a las fracciones arcillosas y el contenido de coloides (partículas dispersas de tamaño menor de 0,1 micra), estos coloides junto a la arcillosidad presentan en el material un comportamiento físico-químico activo que determinara en estos suelos la elevada hidrofiliidad y otras propiedades incluyendo la fluidez bajo el efecto de tensiones tangenciales. La presencia de fracciones de dispersión gruesa no existe, lo que nos indica que estos suelos poseen unas características muy especiales.

Figura 18, Ensayos granulométricos mediante la sedimentación de suelos de los taludes (Probetas).



III.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS

El análisis de las propiedades físico mecánicas de los suelos de las presas de colas esta relacionada con grandes dificultades geotécnicas de investigación, ya que la toma de bloques monolítico, su conservación de su constitución natural, sus muestras y ensayos son complicados y no siempre resultan posible llegar a buenos resultados ya que se requiere de técnicas y medidas especiales. Esta es la razón de la seguridad de los datos para caracterizar su estado físico y propiedades de estos materiales.

Según los datos disponibles el peso específico relativo de estos suelos es elevado superior a 3,8, la porosidad es de 21,7 %, estos suelos son relativamente permeables y en ocasiones son impermeables. Su humedad natural varía entre 21-27 %.

- Los cálculos para la determinación de la porosidad, la saturación y la relación de vacíos son muy importantes para el manejo compresible de las propiedades mecánicas de los suelos y un completo dominio de su significado y sentido físico es imprescindible para poder expresar en forma asequible los datos y conclusiones de este trabajo.
 - Cálculo de la porosidad n (%)

Se llama porosidad de un suelo a la relación entre su volumen de vacíos y el volumen de su masa .Se expresa como porcentaje:

Datos:

$$V_v = 509 \text{ ml}$$

$$V = 2350 \text{ ml}$$

$$n(\%) = \frac{V_v}{V} \times 100$$

$$n = \frac{509 \text{ ml}}{2350 \text{ ml}} \times 100$$

$$n(\%) = 21,7\%$$

Esta relación puede variar de 0 (en un suelo ideal con solo fase sólida) a 100 (espacio vacío). Los valores reales suelen oscilar entre 20% y 95%.

- Cálculo de la saturación s (%)

Datos:

V_w = volumen del líquido

V_v = volumen del vacío

$$s = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

$$s = \frac{646,2ml}{509ml} \times 100$$

$$s = 126,9\%$$

- Cálculo de índice de poros (e) se denomina a la relación entre el volumen de vacíos y el de los sólidos de un suelo:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \times 100$$

$$e = \frac{509 ml}{1841 ml}$$

$$e = 0,3$$

La relación puede variar teóricamente de 0 ($V_v=0$) a ∞ (valor correspondiente a un espacio vacío). En la práctica no suelen hallarse valores menores de 0,25 (arenas muy compactas con finos) ni mayores de 15, en el caso de algunas arcillas altamente compresibles.

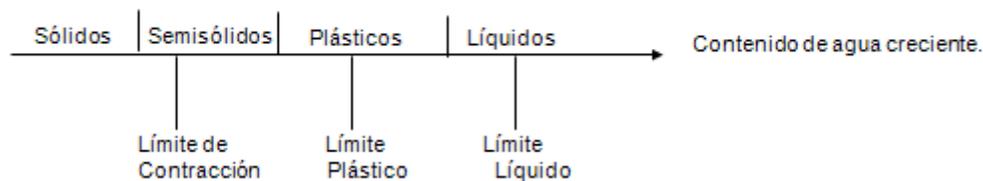
Podemos concluir que los suelos presentes en la presa actualmente poseen una porosidad de 21,7 %, lo que trae como consecuencia elevadas concentraciones de agua en el terreno esto influye en la saturación del mismo, lo cual provoca que disminuya la

compactación de los dique producto a la humedad existentes en ellos. Por lo cual se debe tener en cuenta algunas medidas preventivas para solucionar estos daños.

La plasticidad es la propiedad de los suelos de granos finos con contenido de minerales arcillosos, en presencia de cierto contenido de agua, sin desmoronarse.

En dependencia del contenido de agua la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica en 4 estados básicos.

Figura 19, Esquema de los estados básicos en que se clasifican los suelos, según el contenido de humedad.



Conociendo los valores de límite líquido (L) y límite plástico (L_p) para las muestras tomadas en cada año pudimos calcular el índice de plasticidad (I_p) por la siguiente fórmula.

$$I_p = L - L_p$$

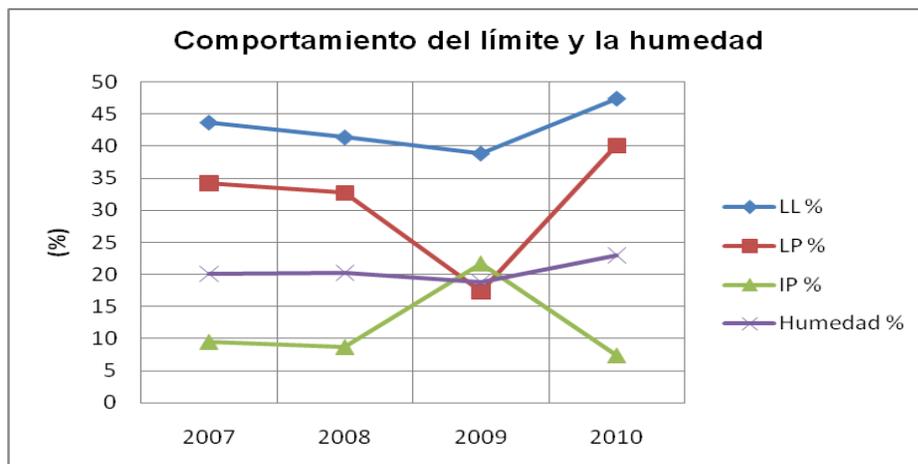
Estos resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Datos obtenidos de los límites Atterberg y la humedad por años.

Años	LL %	LP %	IP %	Humedad %
2007	43.7	34.2	9.5	20.1
2008	41.4	32.7	8.7	20.3
2009	38.9	17.3	21.7	18.8
2010	47.4	40.1	7.4	23

En la siguiente figura 20 según los datos de la tabla 2 se muestra el comportamiento de los límites de atterberg y la humedad de los suelos obtenidos de los estacionados de la parte NE de la presa de cola , en la cual se observa que el límite líquido tiene un comportamiento no muy variable, a diferencia del límite plástico que disminuye grandemente en el año 2009, la humedad del suelo también disminuye lo que influye en la compactación del suelo, lo cual muestra que los materiales de construcción empleados en este año requerían un mayor tratamiento para empleados en la confección de los diques, esto trajo como consecuencia un aumento del índice de plasticidad lo cual posibilita que la permeabilidad decrezca, la tenacidad crezca al igual que la resistencia al estado seco.

Figura 20, Gráfico #7 comportamiento de los límites y la humedad



Según la carta de plasticidad teniendo en cuenta los valores del índice plástico y el límite líquido calculados para cada año pudimos determinar que tipo de material tenemos presentes en el área de estudio.

Figura 21 Clasificación de los suelos por plasticidad, (Carta Casagrande o Gráfico Casagrande).



Ploteando los valores del I_p y el LL obtuvimos los siguientes resultados:

Por encima de la línea A encontramos arcilla.

Por debajo de la línea A encontramos limos.

Limos:

- ML- limo de baja compresibilidad
- MH- limo de alta compresibilidad

Arcillas:

- CL- arcillas de baja compresibilidad.
- CH- arcillas de alta compresibilidad.

Si el límite líquido es mayor del 50%: alta compresibilidad.

Si el límite líquido es menor de 50%: baja compresibilidad.

Por lo tanto en los años analizados determinamos los siguientes tipos de suelos, tomando como referencia los datos obtenidos del análisis granulométrico, los tipos de minerales de arcilla y la carta de plasticidad.

- 2007: arena, limo de baja compresibilidad y arcillas caoliniticas.
- 2008: arena, limo de baja compresibilidad, gravas, y en menor proporción las arcillas caoliniticas.
- 2009: Arena, limo, grava y arcillas del tipo illita de baja compresibilidad.
- 2010: Limo de baja compresibilidad, arena y arcilla del tipo caolinitica.

El comportamiento de estos suelos, al variar sus características de plasticidad puede resumirse en la siguiente tabla. (Tabla VII-1 Libro Mecánica de Suelos página 117, autor: Nabor Carrillo).

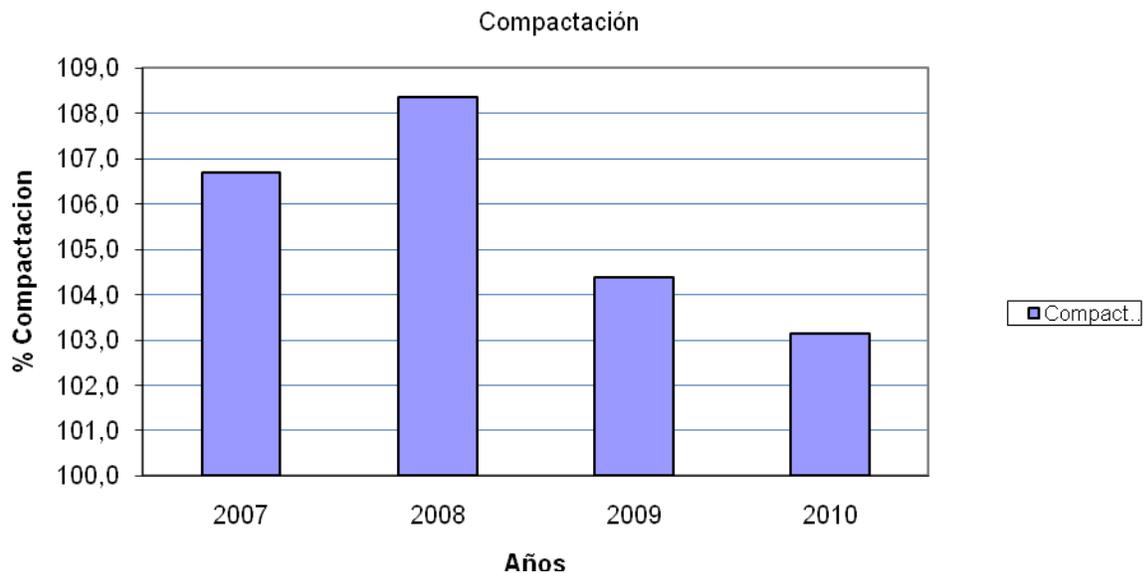
Tabla VII-1 Libro Mecánica de Suelos página 117, autor: Nabor Carrillo.

Característica	Límite líquido constante, pero índice plástico creciente	Límite plástico constante, pero límite líquido creciente
Compresibilidad	Prácticamente la misma	Crece
Permeabilidad	Decrece	Crece
Razón de variación volumétrica	Decrece	—
Tenacidad	Crece	Decrece
Resistencia al estado seco	Crece	Decrece

III.2.4 Análisis de la Compactación

Promedio de compactación por años.

Años	Comp.
2007	106.7
2008	108.4
2009	104.4
2010	103.2



En la Figura 22 podemos observar el gráfico del comportamiento de la compactación a medida que transcurren los años, esto está en correspondencia de los materiales usados para la construcción del dique, en el cual en los últimos años la compactación ha ido disminuyendo ya que el material proveniente de la zona de préstamo para la confección de los diques no tiene las mismas características que en años anteriores. El rango de compactación entre estos años oscila entre 103 hasta 108 % aproximadamente, por lo cual se cumplió con las normas establecidas para la fabricación de diques.

Conclusiones

En esta investigación se llega a las conclusiones siguientes:

1. Los suelos son poco húmedos porque en los años analizados se ha comportado por debajo del 60 %.
2. Granulométricamente el material utilizado para la confección de los diques se clasifica como areno, limo, arcilloso.
3. Según clasificación de la ENIA el I_p obtenido para los diferentes materiales se clasifican de ligeramente plástico a medianamente plástico
4. en los años analizados el % de compactación aunque a tenido una tendencia a la disminución a cumplido con la exigencia de las normas. Esta disminución se corresponde con la disminución en la calidad de los materiales empleados en los diques porque disminuye el contenido arenoso, pero aumenta el contenido limoso.

Recomendaciones

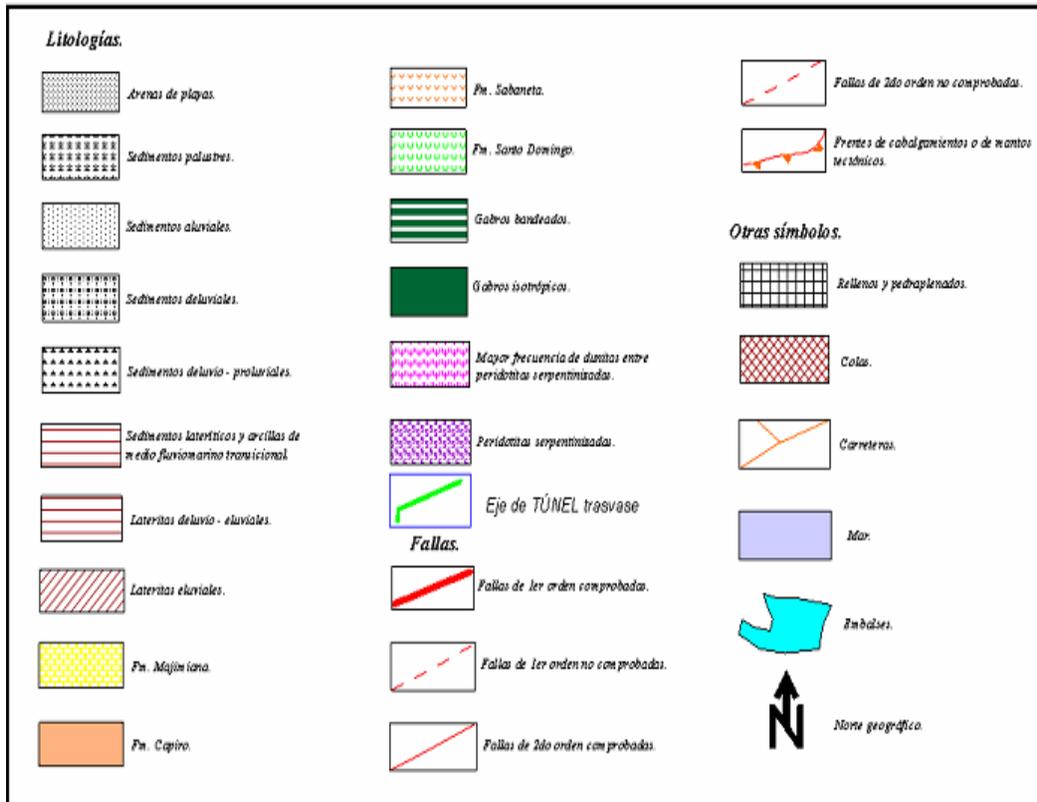
1. Realizar una caracterización a los materiales provenientes de las diferentes áreas de préstamo.
2. Realizar estudios geotécnicos en toda la presa de colas.
3. Realizar cálculos de estabilidad para un mejor conocimiento de la evolución y estado actual de la presa de colas.
4. Ejecutar acciones preventivas que aseguren una adecuada estabilidad de la estructura ante cargas estáticas y dinámicas.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

1. A. Kaplán, Ing. Agr. J. Ponce de León. Ing. Agr. M. Hill S, Ing. Agr. F. García, 2004: Propiedades Físicas del Suelo, Facultad de Agronomía Universidad de la República, Dpto. Suelos y Agua, Montevideo-Uruguay, páginas 1-36.
2. Cancela, MD; 1987: Comportamiento Geotécnico de Presa de Residuos Bajo Acciones Estáticas y Dinámicas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Tesis Doctoral. Pág 11- 41.
3. Estudio de Riesgos para Situaciones de Desastres al Proyecto de Modernización de la Presa de Colas de Moa Nickel S.A. Taller de Riesgos. Agencia de Estudios Ambientales. Geocuba 2009.
4. Estudios de Impacto Ambiental, Proyecto de Ampliación de la Presa de Colas de la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba, Geocuba 2009, Capítulo III pág. 116 a 151.
5. Guardado R, (1986) Ingeniería Petrología, Ingeniería Geológica, Edit. Pueblo y Educación, Segunda Edición, La Habana Cuba. Pág. 18 a 74.
6. Guía para la Administración de Instalaciones de Relaves. Asociación de Minería de Canadá (1998).
7. Heredia Veranes ND, (1978) Propiedades físico mecánica de las colas de níquel. Una Comparación. Ingeniería Civil, 4. (4): 265-269.
8. Hernández Columbié T, Guardado Lacaba R (2009). Presas de Relaves Mineros en la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba, V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales y el Desarrollo Sostenible, CINAREM 2009, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Holguín Cuba Libro de resúmenes.

9. León Gonzalez, M. Propiedades físico mecánicas de las lateritas de Moa en estado natural. ISPJAM, 1978. Tesis Doctoral. Pág. 18 a 26.
10. Moya, J. (2001). Determinación de la geometría de la superficie de rotura en deslizamientos instantáneos: el caso de la balsa minera de Aznalcollar. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Madrid, 27-30 Noviembre de 2001, Vol. III, 1341-1352.
11. Nabor Carrillo, 1963: "Relaciones volumétricas y gravimétricas en los suelos", en *Fundamentos de la mecánica de suelos*, México, D.F., páginas 10-30.
12. Rodríguez, R. 2002. 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.
13. Ing. Sánchez, F.J, 2007: Seguridad de presas: Aportación al Análisis y Control de Deformaciones como Elemento de Prevención de Patologías de Origen Geotécnico. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-Tesis Doctoral. Pág 112 a 123.
14. Sociedad Anónima, Estabilización e Impermeabilización de todo tipo de suelo en el Mundo, ROCAMIX. Ciudad de Panamá. Página 1 a la 9.
15. Troncoso, 1998b; FICEG, 1994; Special Rep. 1996; Calabral et al., 1998; TMW, 1998; PTICEG, 1998). Sistemas de Monitoreo y Gestión. Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión de residuos (TMW, 1998).
16. www.rocamix.com.
17. Zehnder, 1994; TMW, 1998; PTICEG, 1994. Normativas de vertidos.

LEYENDA



Anexos 3: Clasificación de los suelos según SUCS ASTM D2487.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS (SUCS) ASTM D 2487

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos		
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo	
Suelos de partículas gruesas más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada	
		$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada	
	Gravas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa	
		IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa	
	Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No. 200	Cumple los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien graduada con limo	
		Cumple los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla	
		Cumple los criterios para GP y GM	GP-GM	Grava mal graduada con limo	
		Cumple los criterios para GP y GC	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla	
	Arenas El 50% o más de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
			$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
		Arenas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa
		Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No. 200	Cumple los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien graduada con limo
			Cumple los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla
Suelos de partículas finas El 50% o más pasa la malla No. 200	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad	
		IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad	
	Orgánicos	Limite liquido - secado al horno < 0.75	OL	Arcilla orgánica	
		limite liquido - no secado		Limo orgánico	
	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad	
		IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad	
	Orgánicos	Limite liquido - secado al horno < 0.75	OH	Arcilla orgánica	
		limite liquido - no secado		Limo orgánica	
Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro		PT	Turba	

El sistema Unificado de clasificación de suelos, utiliza como identificación los siguientes símbolos:

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos o arcillas orgánicas	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Anexos 4: Propiedades determinadas en el campo y en el laboratorio.

Resultados preliminares de densidad en el campo para los años 2009 y 2010.

Fecha	Lugar	PRELIMINARY FIELD DENSITY RESULTS (PFDR)			
	estació	densidad seca in situ (kg/m ³)	Contenido de humedad in situ (%)	MAX DRY DENSITY (kg/m ³)	Por ciento de compactación (%)
06/01/09	Est 116+00	3126	20.0	2050	152.5
08/01/09	Piscina Sur	2135	20.0	2050	104.1
09/01/09	Est 119+00	2602	20.0	2050	126.9
09/01/09	Piscina Sur	2593	20.0	2050	126.5
13/01/09	Piscina Sur	1735	18.0	2050	84.6
13/01/09	Piscina Sur	1744	18.0	2050	85.1
14/01/09	Nuevo alivero	2215	18.0	2050	108.0
16/01/09	Nuevo alivero	2068	18.0	2050	100.9
16/01/09	Nuevo alivero	1904	18.0	2050	92.9
16/01/09	Nuevo alivero	1837	18.0	2050	89.6
18/01/09	Nuevo alivero	2115	18.0	2050	103.2
27-Oct-09	Est 132+50	1947	23.0	2000	97.4
30-Sep-09	Est 133+50	1896	22.0	2000	94.8
12-Aug-09	Est 123+50	1942	16.0	2000	97.1
22-Jun-09	Est 121+75	1888	18.0	2000	94.4
17-Jun-09	Est 128+75	1932	18.0	2000	96.6
18-Jun-09	Est 0+40	2225	18.0	2000	111.3
18-Jun-09	Est 0+90	1902	19.0	2000	95.1
15-Jun-09	Est 0+40	2104	20.0	2000	105.2
15-Jun-09	Est 0+60	2104	32.0	2000	105.2
2-Jun-09	Est 0+20	1937	20.0	2000	96.9
2-Jun-09	Est 0+40	1921	24.0	2000	96.0
12-May-09	Est 0+30	1723	20.0	2050	84.0
7-May-09	Est 0+60	1925	20.0	2050	93.9
7-May-09	Est 0+50	1911	18.0	2050	93.2
8-Feb-10	Est 113+50	1947	23.0	2000	97.4
5-Mar-10	Est 105+00	1974	23.0	2000	98.7

Anexo 5 Resultados preliminares de densidad en el campo para los años 2007 y 2008.

Fecha	Lugar	PRELIMINARY FIELD DENSITY RESULTS (PFDR)			
	estació	densidad seca in situ (kg/m ³)	Contenido de humedad in situ (%)	MAX DRY DENSITY (kg/m ³)	Por ciento de compactación (%)
02/07/07	Est 123+50	2064	17.0	2050	100.7
14/08/07	Est 120+50	2188	21.1	2050	106.7
16/08/07	Est 125+50	2079	21.1	2050	101.4
26/08/07	Est 125+50	2066	21.1	2050	100.8
07/09/07	Est 106+00	1963	14.2	2050	95.8
13/09/07	Est 109+01	1947	17.0	2050	95.0
15/09/07	Est 134+00	1938	23.7	2050	94.5
18/01/08	Est 98+50	2012	20.0	2050	98.1
24/01/08	Est 108+75	2046	18.0	2050	99.8
05/02/08	Est 96+00	2046	18.0	2050	99.8
20/02/08	Est 114+50	2100	20.0	2050	102.4
28/02/08	Est 117+00	2558	20.0	2050	124.8
07/03/08	Est 94.50	2702	20.5	2050	131.8
11/03/08	Est 116+50	2291	20.0	2050	111.8
12/04/08	Est 132+00	2816	20.5	2050	137.4
23/04/08	Est 127+75	1811	21.0	2050	88.3
29/05/08	Est 129+00	1819	20.0	2050	88.7
25/06/08	Est 120+00	1968	21.0	2050	96.0
19/07/08	Est 127+00	2225	20.0	2050	108.5
01/10/08	Est 96+00	1950	20.0	2050	95.1
09/10/08	Est 98+50	1708	20.0	2050	83.3
03/12/08	Est 100+00	1725	19.0	2050	84.1

Anexo 6. Límites de Atterberg determinados en el laboratorio para los años 2009 y 2010

Fecha	Lugar	LIMITES ATTERBERG		
	estación	LL (%)	PL (%)	PI (%)
06/01/09	Est 116+00	35.5	23.7	11.9
08/01/09	Piscina Sur	23.3	16.5	6.8
09/01/09	Est 119+00	26.9	22.4	4.5
09/01/09	Piscina Sur			
13/01/09	Piscina Sur			
13/01/09	Piscina Sur			
14/01/09	Nuevo alivero			
16/01/09	Nuevo alivero			
16/01/09	Nuevo alivero			
16/01/09	Nuevo alivero			
18/01/09	Nuevo alivero			
27-Oct-09	Est 132+50	42.4	35.8	6.5
30-Sep-09	Est 133+50	45.8	44.2	1.7
12-Aug-09	Est 123+50	47.2	40.2	7.0
22-Jun-09	Est 121+75	48.4	0.0	48.4
17-Jun-09	Est 128+75	36.7	0.0	36.7
18-Jun-09	Est 0+40	43.3	0.0	43.3
18-Jun-09	Est 0+90	44.0	27.2	16.8
15-Jun-09	Est 0+40	42.2	0.0	42.2
15-Jun-09	Est 0+60	41.6	0.0	41.6
2-Jun-09	Est 0+20	50.8	35.5	15.3
2-Jun-09	Est 0+40	34.3	29.6	4.7
12-May-09	Est 0+30	52.1	0.0	52.1
7-May-09	Est 0+60	44.4	0.0	44.4
7-May-09	Est 0+50	44.2	0.0	44.2
8-Feb-10	Est 113+50	47.4	40.1	7.4
5-Mar-10	Est 105+00	38.8	28.0	10.9

Anexo 7. Límites de Atterberg determinados en el laboratorio para los años 2007 y 2008.

Fecha	Lugar	LÍMITES ATTERBERG		
	estación	LL (%)	PL (%)	PI (%)
02/07/07	Est 123+50	45.3	35.1	10.2
14/08/07	Est 120+50	42.3	28.4	13.9
16/08/07	Est 125+50	40.8	37.3	3.5
26/08/07	Est 125+50	46.3	36.0	10.3
07/09/07	Est 106+00	44.9	34.9	10.0
13/09/07	Est 109+01	42.1	34.9	7.2
15/09/07	Est 134+00	44.5	32.8	11.7
18/01/08	Est 98+50	45.7	43.1	2.6
24/01/08	Est 108+75	35.7	33.9	1.8
05/02/08	Est 96+00	53.2	28.4	24.8
20/02/08	Est 114+50	37.3	28.7	8.6
28/02/08	Est 117+00	32.0	26.5	5.5
07/03/08	Est 94.50	39.3	24.8	14.6
11/03/08	Est 116+50	37.8	30.9	6.9
12/04/08	Est 132+00	37.3	35.1	2.2
23/04/08	Est 127+75	40.4	37.1	3.3
29/05/08	Est 129+00	34.5	32.1	2.4
25/06/08	Est 120+00	58.1	32.1	26.0
19/07/08	Est 127+00	49.7	41.5	8.2
01/10/08	Est 96+00	23.1	16.9	6.2
09/10/08	Est 98+50	32.3	22.8	9.5
03/12/08	Est 100+00	36.3	21.2	15.2

Anexo 8. Resultados finales de la densidad, humedad y compactación determinados en el laboratorio para los años 2007 y 2008

Fecha	Lugar	DENSIDAD LAB (Standard Proctor)		FINAL DENSITY RESULTS (FDR)		
	estacio	DENSIDAD SECA MAX (kg/m ³)	CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA (%)	DENSIDAD SECA (kg/m ³)	CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMA (%)	RESULTADOS FINAL DE COMPACTACIÓN (%)
02/07/07	Est 123+50	1920	22.8	1891	27.7	98.5
14/08/07	Est 120+50	1918	21.1	2115	25.3	110.3
16/08/07	Est 125+50	1770	21.0	1952	29.0	110.3
26/08/07	Est 125+50	1650	18.5	2189	14.3	132.7
07/09/07	Est 106+00	1880	16.5	1789	25.3	95.2
13/09/07	Est 109+01	1855	22.0	1992	14.4	107.4
15/09/07	Est 134+00	2090	19.3	1938	23.7	92.7
18/01/08	Est 98+50	2000	23.1	2029	19.0	101.5
24/01/08	Est 108+75	2235	18.6	1999	20.8	89.4
05/02/08	Est 96+00	1505	25.5	1764	36.9	117.2
20/02/08	Est 114+50	1980	22.2	2046	23.2	103.3
28/02/08	Est 117+00	1990	19.4	2450	25.3	123.1
07/03/08	Est 94.50	1930	22.5	2757	18.1	142.8
11/03/08	Est 116+50	1740	20.9	2312	18.9	132.9
12/04/08	Est 132+00	1890	23.6	2761	22.9	146.1
23/04/08	Est 127+75	1660	21.4	1834	19.5	110.5
29/05/08	Est 129+00	2090	19.9	1860	22.0	89.0
25/06/08	Est 120+00	2015	20.0	1935	21.0	96.0
19/07/08	Est 127+00	2075	21.3	2184	22.2	105.3
01/10/08	Est 96+00	2088	12.4	1902	23.0	91.1
09/10/08	Est 98+50	1899	19.6	1721	19.1	90.6
03/12/08	Est 100+00	1976	17.2	1713	19.8	86.7

Anexo 9. Resultados finales de la densidad, humedad y compactación, determinados en el laboratorio para los años 2009 y 2010.

Fecha	Lugar	DENSIDAD LAB (Standard Proctor)		FINAL DENSITY RESULTS (FDR)	CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMA (%)	RESULTADOS FINAL DE COMPACTACIÓN (%)
	estación	DENSIDAD SECA MAX (kg/m ³)	CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMA (%)	DENSIDAD SECA (kg/m ³)		
06/01/09	Est 116+00	2041	24.5	3126	20.0	153.2
08/01/09	Piscina Sur	2060	16.7	2116	21.1	102.7
09/01/09	Est 119+00	2120	21.9	2604	19.9	122.8
09/01/09	Piscina Sur	2050	18.0	2554	21.8	124.6
13/01/09	Piscina Sur	2029	19.9	1605	27.6	79.1
13/01/09	Piscina Sur	2040	18.9	1672	23.1	82.0
14/01/09	Nuevo alivero	2300	17.0	2180	19.9	94.8
16/01/09	Nuevo alivero	1990	21.2	2055	18.7	103.3
16/01/09	Nuevo alivero	1930	21.0	1927	16.6	99.8
16/01/09	Nuevo alivero	2160	18.4	1894	14.4	87.7
18/01/09	Nuevo alivero	1651	30.1	2101	18.8	127.3
27-Oct-09	Est 132+50	1940	26.7	1889	26.8	97.4
30-Sep-09	Est 133+50	1790	27.4	1816	27.4	101.5
12-Aug-09	Est 123+50	1740	21.5	1857	21.3	106.7
22-Jun-09	Est 121+75	1945	20.4	1798	23.9	92.4
17-Jun-09	Est 128+75	1998	19.1	1928	18.2	96.5
18-Jun-09	Est 0+40	1992	20.5	2168	21.1	108.8
18-Jun-09	Est 0+90	1885	22.0	1795	26.1	95.2
15-Jun-09	Est 0+40	1846	25.2	2001	26.2	108.4
15-Jun-09	Est 0+60	1830	26.1	2236	24.2	122.2
2-Jun-09	Est 0+20	1765	25.5	1808	28.5	102.4
2-Jun-09	Est 0+40	1860	26.8	1769	34.7	95.1
12-May-09	Est 0+30	1715	27.2	1578	31.0	92.0
7-May-09	Est 0+60	1675	26.0	1845	25.4	110.1
7-May-09	Est 0+50	1655	29.1	1719	31.2	103.9
8-Feb-10	Est 113+50	1775	23.4	1878	27.5	105.8
5-Mar-10	Est 105+00	1990	21.1	2000	21.4	100.5

Anexo 10. Mapa de la Presa de Colas de la Fábrica Pedro Sotillo Alba.

