

"ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE LAS COLAS
DEL NIQUEL"

por

NOEL HEREDIA VERANES, ING. GEOLOGO

Tesis

Presentada al Departamento de Estudios para Graduados de la Vicerrectoría de Investigaciones y Postgrado del Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", como parte de los requerimientos para el Curso de Especialista en Mecánica de Suelos.

FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
INSTITUTO SUPERIOR POLITECNICO
"JOSE ANTONIO ECHEVERRIA"
HABANA, CUBA

MARZO, 1978

El Departamento de Estudios para Graduados de la Vicerrectoría de Investigaciones y Postgrado del Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría, solicita la firma de todas las personas que consulten esta tesis.

Por favor, firme debajo con su dirección, organismo a que pertenece y fecha.

Declaro que soy el único autor de esta Tesis.
Autorizo al Instituto Superior Politécnico "Jo
sé Antonio Echeverría" a que haga de esta Tesis
el uso que estime pertinente.

Firma: _____



R E S U M E N

Se establecen las propiedades físico-mecánicas de las colas, correspondientes a las fábricas de Moa y Nicaro por primera vez en nuestro país, estableciendo las diferencias en cuanto a propiedades entre ambas.

Se estudian la estabilidad de los diques de estas presas de cola por los métodos de BISHOP y FELLENIUS mediante un programa de computadoras.

Con los resultados obtenidos de las propiedades físico-mecánicas, así como del cálculo de la estabilidad de los diques, se establecen conclusiones y recomendaciones prácticas que aseguren la estabilidad actual en el caso de la presa de cola de Nicaro, y la futura en el caso de Moa. Se sientan además las premisas para futuras investigaciones geotécnicas, con el fin de aclarar puntos no tratados en el trabajo.

A G R A D E C I M I E N T O S

El autor desea agradecer a todos los compañeros que directa e indirectamente hicieron posible la culminación del trabajo.

De manera muy especial al Profesor Auxiliar Evelio Horta, que bajo su tutoría y con su alentadora y constante atención, nos ayudó en la realización de todo el trabajo; de la misma manera a la Doctora Regina E. Dashkó, del Instituto de Minas de - Leningrado, la cual propuso la metodología a seguir en el trabajo.

Al Profesor Auxiliar Miguel León, que revisó parte del manuscrito, aportando valiosos consejos.

A todos los compañeros del Establecimiento Moa, del EIA - 6 , así como a los técnicos de laboratorio de Geotecnia del - - - ISPJAE.

Por último, a los compañeros Marianela Alvarez y Eduardo Macías, los cuales se entregaron a la tediosa misión de la mecanografía de todo el trabajo, así como la realización de los dibujos que forman parte de los anexos gráficos, respectivamente.

21 de Marzo de 1978

- Moa -

NOMENCLATURA

		UNIDADES
A_v	Coefficiente de Compresibilidad	cm^2/kg
B	Indice de Liquidez	Adimensional
C_v	Coefficiente de Consolidación	$\text{cm}^2/\text{seg.}$
E_s	Módulo de deformación edométrico	kg/cm^2
G_s	Peso específico relativo de los sólidos	Adimensional
IP	Indice de plasticidad	%
LL	Límite líquido	%
LP	Límite plástico	%
M_v	Coefficiente de cambio volumétrico	cm^2/kg
S_r	Grado de saturación	%
c	Cohesión	kg/cm^2 o T/m^2
e	Indice de Poros	Adimensional
w	Contenido de humedad	%
γ_f	Densidad húmeda	gr/cm^3 o T/m^3
γ_0	Densidad seca	" "
γ'	Densidad sumergida	" "
γ_{sat}	Densidad saturada	" "
$\sigma, (\sigma')$	Presión normal, (efectiva)	kg/cm^2
τ	Esfuerzo cortante	kg/cm^2
ϕ	Angulo de fricción interna	Grados

TABLA DE CONTENIDOS

PAGINA

RESUMEN

i

RECONOCIMIENTOS

ii

NOMENCLATURA

iii

INTRODUCCION

3

CAPITULO I- CARACTERISTICAS GEOLOGICAS GENERALES DE LAS CONDICIONES NATURALES DEL AREA EN QUE SE EN CUENTRAN LAS COLAS.

1.1 Proceso de formación de las lateritas como fuente principal.

6

1.1.1 Características geológicas generales de los yacimientos de minerales lateríticos.

6

1.2 Condiciones físico-geográficas del área de deposición de las colas.

10

1.2.1 Colas Nicaro.

10

1.2.2 Colas Moa.

12

1.3 Breve característica estratigráfica del área que ocupan las colas.

13

1.4 Tecnología del proceso de deposición de las colas de Nicaro y Moa.

14

1.4.1 Formación de las colas.

14

1.4.2 Traslado de las colas hacia las presas.

15

CAPITULO II-PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LAS COLAS DE NICARO.

2.1 Colas de Nicaro.

18

2.1.1 Granulometría.

18

2.1.2 Humedad.

20

2.1.3 Plasticidad.

22

2.1.4 Peso específico relativo de los sólidos.

25

2.1.5 Densidad

26

2.1.6 Índice de poros.

27

2.1.7 Grado de saturación.

28

2.1.8 Consolidación

29

2.1.9 Resistencia al cortante.	33
CAPITULO III.-PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LAS COLAS DE MOA.	
3.1 Colas de Moa	44
3.1.1 Granulometría.	44
3.1.2 Humedad.	45
3.1.3 Plasticidad.	47
3.1.4 Peso específico relativo de los sólidos.	50
3.1.5 Densidad.	51
3.1.6 Índice de Poros.	52
3.1.7 Grado de Saturación.	52
3.1.8 Consolidación.	52
3.1.9 Resistencia al cortante.	54
CAPITULO IV.- CALCULO DE LA ESTABILIDAD DE LAS COLAS	
4.1 Características generales del diseño de presas de cola.	59
4.1.1 Comparación de los esquemas de diseño en el extranjero y en Cuba.	60
4.2 Análisis de la estabilidad de la presa de cola de Nicaro.	62
4.3 Análisis de la estabilidad de la presa de cola de Moa.	71
CAPITULO V.- CONCLUSIONES	
REFERENCIAS.	82

INTRODUCCION.

En el informe del Comité Central del PCC al Primer Congreso, el Comandante en Jefe Fidel Castro, analizando el desarrollo económico para los próximos cinco años planteó entre las múltiples tareas que tenía por delante la Revolución, la rehabilitación de las dos plantas actuales de níquel, elevándose su capacidad y se llevará adelante la construcción de dos nuevas instalaciones con 30 mil toneladas de capacidad cada una, ambas en la zona de Moa.

Resulta obvio, que el desarrollo minero-metalúrgico que se experimenta actualmente en nuestro país, acusa técnicas cada vez más complejas, con vista a consolidar nuestro desarrollo económico, más aún si se tiene en cuenta que entre las materias primas minerales, la de mayor importancia en Cuba corresponde a los yacimientos en explotación, de corteza de intemperismo, ricos en Ni, Co y Fe; cuyas reservas comprobadas ascienden a varios centenares de millones de toneladas. Estos yacimientos tienen una importancia mundial y los principales son: Moa, Nicaro y Pinares de Mayarí.

Las empresas metalúrgicas "Comandante Pedro Soto Alba", de Moa y "Comandante René Ramos Latour", de Nicaro, constituyen dos fábricas fundamentales en nuestra economía, siendo las únicas que explotan las minas lateríticas con fines de obtener Ni y Co. El proceso de producción de las mismas, no incluye la obtención de Fe, Cr y otros elementos que forman parte de las minas lateríticas. El Fe, que se encuentra en el orden del 40% en dichas minas, junto a otros elementos son trasladados en forma de líquidos.

do fuera de la planta y almacenados en unos depósitos o presas cercanos a ella y constituyen la parte del mineral que no se explota y queda como residuo de la producción. Dichos materiales forman las llamadas colas.

Estas colas en ambas fábricas se almacenan en presas, alcanzando niveles tales, que pueden conceptuarse como yacimientos de Fe; que pueden ser explotados con relativa facilidad, por la poca cantidad de impurezas que contienen.

En este sentido el presente trabajo aborda el estudio de las colas, desde el punto de vista geotécnico, el cual no presenta antecedentes en nuestro país, siendo además muy pobre aún la bibliografía con que se cuenta en este campo en Cuba.

Siguiendo la importancia que las reservas de Fe y otros elementos presentan para el país en los próximos años, es que prestamos atención especial al estudio de las mismas.

Por esta razón el presente trabajo constituye un punto de partida para futuras investigaciones en este campo, particularmente virgen en el país.

Los objetivos que nos proponemos en el mismo son los siguientes:

- 1.- Establecer las propiedades físico-mecánicas fundamentales de las colas de las Empresas metalúrgicas de Nicaro y Moa; con vistas a su utilización como material de construcción para la propia presa.
- 2.- Establecer el análisis de la estabilidad actual de la presa de Nicaro utilizando el diseño existente y el análisis de la presa de Moa, para los próximos años.
- 3.- Establecer la diferencia de los esquemas de cálculo de la es

tabilidad en el extranjero y en Cuba, a partir de las dos presas objeto de nuestro análisis.

Adicionalmente se recogen las exigencias que en cuanto a diseño requieren las presas de cola; la forma en que se trata este asunto en el extranjero y como se trata en Cuba; además de la contaminación que provocan al medio la descarga del componente líquido de las colas hacia el exterior de la presa.

La metodología usada en el desarrollo del trabajo consistió de - tomas de muestras inalteradas y remoldeadas en la zona del embalse de las colas, así como en la zona del dique, y determinación posterior de las propiedades físico-mecánicas en dos laboratorios. Para el cálculo de la estabilidad de las presas se usó un programa de computadoras, analizando la misma por dos métodos simultáneamente, BISHOP y FELLENIUS, estableciéndose diversas variantes en ambas presas.

Estas variantes se diferenciaban en dependencia de la altura de colas en las presas, la profundidad y el alejamiento a partir del dique, del NF en el interior de la presa y las propiedades físico-mecánicas de los distintos tipos de suelos presentes en cada sección analizada.

CAPITULO I - CARACTERISTICAS GEOLOGICAS GENERALES DE LAS CONDICIONES NATURALES DEL AREA EN QUE SE ENCUENTRAN LAS COLAS

1.1 PROCESO DE FORMACION DE LAS LATERITAS.

Los minerales de níquel de Cuba son típicas lateritas, altamente lixiviadas, terrenos rojos hasta amarillos, con alto contenido de óxidos de hierro y aluminio. Se tratan de concentrados residuales producto del intemperismo químico de las rocas de composición peridotítica, las serpentinitas.

Para que ocurra la laterización se necesita de la acción simultánea de una serie de factores como son:

- 1 - Clima cálido y húmedo, favorable a un intenso intemperismo químico.
- 2 - Una topografía plana o casi plana (peniplana) donde el agua - tenga poca fuerza para eliminar los productos del intemperismo químico.

- 3 - Suficiente tiempo de exposición del proceso de intemperismo

Las rocas serpentiniticas forman una extensa faja a través de la parte norte de la provincia de Holguín, al este de Cuba, igualmente aparecen las serpentinitas o igualmente lateritas que contienen níquel, en las provincias de Pinar del Río y Camagüey, en las partes oeste y central de Cuba respectivamente, pero éstas son de menor importancia. Las áreas llanas o ligeramente inclinadas están por lo general cubiertas por estos productos de la laterización, que se desprende de las partes inclinadas o pendientes, 3.

1.1.1 Características geológicas generales de los yacimientos minerales lateríticos, 6.

Los yacimientos de Ni y Fe en la costa norte de la región orient

tal de Cuba, representan yacimientos de la corteza de intemperis-
mo tipo plataforma. Están relacionados con grandes macizos de --
las harzburgitas y harzburgitas serpentinizadas, las cuales se
encuentran en las áreas influyentes de las montañas de la Sierra
Cristal (yacimiento Nicaro), Sierra de Nipe (yacimiento Pinares
de Mayarí) y Sierra de Moa (yacimiento de Moa). Todas las ocu --
rrencias de los yacimientos de minerales de níquel y hierro es --
tán caracterizados por una gran variabilidad de los componentes
industriales básicos (Ni, Co, Fe), tanto en sentido vertical -
como horizontal.

Morfológicamente se relacionan con una meseta del tipo Pinares -
de Mayarí, o están situados en terrenos muy accidentados con ---
grandes alturas relativas (Nicaro), o se encuentran en terrenos
ligeramente ondulados (Moa). La forma y extensión de los yaci --
mientos de intemperismo laterítico dependen enteramente del re --
lieve del terreno. En las partes llanas o de pendientes suaves,
los cuerpos de mineral se conservaron mientras que en las eleva-
ciones bruscas surgió la erosión y el transporte.

Macroscópicamente el perfil estratigráfico ideal de estos yaci -
mientos es el siguiente:

El fondo de las capas productivas lo forman las harzburgitas --
serpentinizadas estériles. El relieve del fondo es irregular, co
mo típica es la presencia de bolsones en sentido vertical.

Arriba de las serpentinitas yacen las serpentinitas fuertemente
desintegradas de espesor variable, que representan el material -
color gris-verde, amarillo-verde o amarillo-marrón claro. Estas

capas generalmente son mas ricas en Ni, Mg, y SiO_2 , y mas pobres en Co, Fe, y Al. Por encima de las capas anteriores, típicas - por su variable contenido y espesor, se encuentran porciones - de lateritas blandas, arcillas de color rojo o marrón oscuro , caracterizadas por tener menor contenido de Ni, Mg y SiO_2 y mayor contenido de Fe, Co, y Al. Estas partes se transforman po- co a poco en lateritas ferruginosas, que afloran en la superfi- cie. Estas sí están caracterizadas por un color rojo violáceo oscuro y por contener en cantidades considerables concreciones de Fe y por sus bajos contenidos de Ni, Mg y SiO_2 .

En realidad el perfil estratigráfico descrito no está desarro- llado en cada ocasión plenamente. Muy a menudo faltan algunos niveles completamente o se desarrollan parcialmente en forma - lenticular.

Los yacimientos de la región oriental, donde se extrae la mate- ria prima, se distinguen uno del otro según el relieve del te- rreno según diferentes contenidos de los componentes industria- les, según diferente correlación entre los niveles del perfil estratigráfico, sus espesores y según diferente influencia de la redeposición del mineral, son los siguientes:

YACIMIENTO PINARES DE MAYARI

Se encuentra en la meseta con cotas absolutas medias de 550 m, aproximadamente sobre el nivel del mar. Las alturas relativas - se aproximan a los 1000 m. El yacimiento es de gran extensión - con relativamente pequeños espesores en la corteza de intempe- rismo, en la que, excepto las partes limitantes, no están desa- rrolladas las serpentinitas de color amarilló-verdoso ricas en Ni.

YACIMIENTO NICARO

Esta' relacionado con un terreno muy ondulado con cotas absolutas medias de 300m sobre el nivel del mar. Las alturas relativas se aproximan a unos 400m. o mas.

Lo típico para este yacimiento son los pequeños pero variables espesores de la corteza de intemperismo y están fuertemente desarro-
lladas las serpentinitas de color amarillo verdoso, ricas en ní --
quel.

YACIMIENTO MOA

Es el más grande de todos por su extensión, se encuentra en un relieve con ligeras pendientes con cotas medias absolutas de unos -
180 m. sobre el nivel del mar. Las alturas relativas llegan hasta
los 300 m. Lo característico para el mismo son grandes espesores
de la corteza laterítica, ocurrencia variable de las serpentini -
tas intemperizadas de color verde-amarillento, ricas en níquel y
una fuerte influencia en la redeposición de los minerales.

A pesar de que actualmente se encuentra estabilizado el perfil estratigráfico, se puede observar en el mismo la estratificación fina discontinua, a menudo, con láminas entrecruzadas. Las capas finas se diferencia macroscópicamente del resto tanto por su grana -
lometría diferente así como por el color.

1.2 CONDICIONES FISICO-GEOGRAFICAS DEL AREA DE DEPOSICION DE LAS COLAS.

1.2.1 PRESA DE COLAS DE NICARO

La presa que retiene las colas de la planta de Nicaro está limitada por las coordenadas de Lambert:

X - 632 500 - 633 900

Hoja 5078 II

Y - 225 700 - 227 300

Escala 1:50000

El área que ocupa la presa de cola está ubicada en el interior del mar, en la parte sureste de la bahía Arroyo Blanco, encontrándose al oeste de la fábrica "René Ramos Latour" de Nicaro. La fábrica, así como sus talleres auxiliares y la ciudad en cuestión se encuentra en la península Lengua de Pájaro, que penetra profundamente en la bahía de Levisa hacia el norte, separando a esta última de la bahía Arroyo Blanco, donde se encuentran las colas. El acceso a la presa es factible por vía terrestre o marítima. Las colas se depositan aquí a partir de enero de 1958, a razón de 5000 Ton. diarias aproximadamente. En estos años de existencia las reservas totales para el yacimiento de colas formado asciende a más de 40 millones de Ton. de mineral, con un contenido de hierro del orden del 40%, de cromo superior al 1% y de níquel en mucha menor proporción que el cromo. Por su morfología y regularidad en la distribución de los componentes minerales útiles, la presa de cola forma un yacimiento de categoría media en cuanto a potencia y calidad.

La construcción inicial del embalse comenzó con la construcción de un dique inicial en el interior del mar, de altura variable en dependencia del nivel de las aguas oscilando entre 1,4 y 6,0 m. con un ancho variable en su corona, llegando en algunos puntos a

más de 7,00 m . Con los incrementos recientes del nivel de colas en un período de 20 años, se hizo necesaria la continuación del dique inicial hacia arriba, utilizando para ello la propia cola - descargada directamente sobre el dique inicial siguiendo un esquema de diseño aguas arriba. Esto último se explica en el capítulo IV. Con el transcurso del tiempo, esta situación se repitió y se continuó de la misma manera sobre las colas anteriores y así sucesivamente. En la actualidad el espesor máximo que presentan las colas en el depósito está cercano a los 20 m .

La superficie inferior de las colas se encuentran bajo el nivel del mar en límites que varían desde 1 - 2 m hasta 5 - 6 m. El área de la presa tiene forma irregular de aproximadamente 1,6 km², - limitando al norte, oeste y sureste con el mar y con terraplenes de acceso al este (fig. 1.2.1.1). Al sur se acuna con la línea sinuosa de la costa.

A una distancia aproximada de 1,2 km al SE de la fábrica, se encuentra otro embalse de colas ya en desuso. El mismo se usó desde la puesta en marcha de la fábrica en 1943 hasta diciembre de 1957. Las reservas de colas en este depósito sobrepasan los 9 millones de Ton., presentando altos contenidos de Fe y Cr y Ni en menor cantidad.

La temperatura media anual del aire en el área es superior a los 26° c . Las temperaturas medias mensuales para el mes de enero se encuentran entre 22° - 24° c., en abril de 25° c y mayor, en julio de 27° c. y mayor, y para el mes de octubre se presenta entre 25° - 27° c. Las precipitaciones alcanzan valores de 400 - 600 mm para el período lluvioso de mayo a octubre, y la media anual está entre 1200 - 1400 mm, alcanzando la evaporación valores sobre 1600

mm. Los vientos soplan predominantemente en dirección de este a oeste (1).

1.2.2 PRESA DE COLAS DE MOA

El área que ocupan las colas de Moa se encuentran limitadas por las coordenadas Lambert:

X - 700 200 - 701 300

Hoja 5277 IV

Y - 220 800 - 221 700

Escala 1:50000

Se localiza en un área llamada La Veguita cercana a 1 km aprox. de la fábrica "Pedro Soto Alba", y a unos 4 km al E de la ciudad de Moa. Posee comunicaciones terrestres que llegan hasta la misma y abarca un área de 1,5 km² aprox. . En la misma se vierten colas a partir del año 1975, a razón de 3200 m³ diarios aprox. . Este hecho la sitúa como una presa relativamente joven . Las reservas totales actuales son pocas encontrándose en el orden de 2 millones de Ton. con un alto contenido de Fe (40 % y mayor), trazas de Ni , Mn y otros elementos. Su construcción comenzó con un dique inicial de laterita compactada de 4 m de altura. Aún en la actualidad el nivel de las colas en el interior de la presa no rebasa la mitad del dique y no ha sido necesario por tanto la continuación del dique a niveles superiores. La presa posee una configuración irregular y está situada en una zona baja, donde los sedimentos que forman la misma poseen propiedades deformativas y de resistencia que los hacen desfavorables desde el punto de vista geotécnico.

La temperatura media anual del aire supera al igual que en Nicaragua los 26° c. . La media mensual en enero es mayor de 24° c., en abril mayor de 25° c., y en julio y octubre se presenta igual o mayor que 27° c. . Las precipitaciones, durante el período lluvioso entre mayo y octubre se encuentra entre 400 y 600 mm, así como la media anual entre 1200 - 1400 mm. La evaporación anual supera los 1500 -

mm. . La dirección de los vientos es igual al área de Nicaro. La intensidad promedio del viento es de aprox. 15 nudos.

1.3 BRVE CARACTERISTICA ESTRATIGRAFICA EL AREA QUE OCUPAN LAS COLAS.

El área que ocupa la presa de colas de Nicaro está situada en el mar, y desde el punto de vista estratigráfico sólo presenta un interés los suelos que le sirven de base natural o subyacentes. Ellos están constituidos por arcillas de origen marino poco profundas, de edad cuaternaria. Se caracterizan por presentar un color gris verdoso con gran porcentaje de gasterópodos y restos marinos. Presentan alta densidad y son prácticamente impermeables. La potencia que presentan es siempre mayor de 2 m. .

Bordeando la costa se presenta una arcilla de color variable con restos de vegetales, arena y fragmentos de rocas; éstas son de origen continental. En el flanco oriental de la presa se observa subyaciendo a las colas, una intercalación pequeña de lateritas de poco espesor. A los lados del depósito, en la zona de la costa se encuentran pequeñas elevaciones constituidas por calizas y margas neogénicas combinadas con areniscas.

En el caso de Moa, las colas se depositan en una zona baja formada por un valle amplio; esta zona constituía una cuenca de almacenamiento de agua de forma temporal, proveniente de las precipitaciones.

Los suelos de cimentación están representados hacia la parte oriental por una capa vegetal de potencia variable que no excede los 0,5 m., y luego aparecen suelos arcillosos con mezcla de arena y grava, de origen laterítico. La potencia de los mismos varía pudiendo aparecer directamente en la superficie hasta una profundi-

dad mayor de los 2 m . Las propiedades físico-mecánicas hacia esta parte oriental de la presa se presentan en general desfavorables, con bajos valores de las densidades así como de sus características de resistencia. Los suelos que forman esta parte resultan por tanto poco estables, pudiendo presentar una gran deformabilidad con el aumento posterior de las cargas producto del peso propio de las colas.

En la parte oeste de la presa, subyacen suelos de origen laterítico, con abundante cantidad de perdigones, con potencias mayores de 2 m. . Estos presentan propiedades físico-mecánicas mejores, como material de cimentación en comparación con los de la parte oriental.

1.4 TECNOLOGIA DEL PROCESO DE FORMACION Y TRASLADO DE LAS COLAS.

1.4.1 Formación de las colas.

Las colas de las fábricas metalúrgicas "Pedro Soto Alba" de Moa y "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro, representan un producto que contiene un porcentaje elevado de hierro como resultado de los procesos hidrometalúrgicos en la primera y pirometalúrgico en la segunda, para extraer Ni y Co de las menas lateríticas.

En la fábrica de Nicaro, los residuos de producción después de la destilación con amoníaco se trasladan en estado de pulpa caliente a la presa de colas, situada en la bahía de Arroyo Blanco. Estos residuos constituyen las colas que son una valiosa fuente de materia prima y presentan gran interés para la industria metalúrgica por el alto contenido de hierro (38 - 42%), y porque además las reservas son considerables, incrementándose anualmente en 2 millones de Ton. aprox.

La fábrica de Moa traslada luego del proceso metalúrgico los resi

duos de producción hacia la presa de colas situada en La Veguita. El proceso que se emplea para la obtención de los sulfuros de Ni y Co, es hidrometalúrgico en la preparación de la pulpa, utilizando SO_4H_2 para la lixiviación del mineral. El mineral proveniente de la mina pasa primeramente por la planta de preparación de pulpa. Aquí se desechan los fragmentos gruesos de serpentinitas y otros componentes ricos en hierro y aluminio, trasladando éstos hacia zonas alejadas, estos materiales constituyen el rechazo durante el proceso y no son el objeto de nuestro estudio. Luego de dejar el rechazo se traslada la pulpa que consiste en una mezcla viscosa de los componentes lateríticos ricos en Ni y Co, que son solubles, mientras que otros sulfatos como los de Fe, Mg y otros precipitan. Como resultado de este proceso de lavado que se realiza utilizando el método de tanques a contracorriente, comienza un proceso de beneficio posterior del licor así formado consistente en la solución rica en Ni y Co antes mencionada, y los componentes precipitados en el proceso después del lavado, formarán las llamadas colas (objeto de nuestro estudio), que son trasladadas a las presas.

1.4.2 Traslado de las colas hacia las presas.

En este sentido no existe una metodología establecida para este proceso actualmente en Cuba. Tanto las colas de Nicaro como las de Moa, se depositan en sus respectivas presas sin atender a una metodología especial. En un caso y en el otro, la cola se vierte en el interior de la presa mediante tubos metálicos; las ubicaciones de las terminales de los tubos se cambian en dependencia de la forma en que se llena el área interior diferencialmente, sin atender a otra razón técnica. Esta operación es llevada a cabo luego de varios años por los propios operadores de la fábrica, tratando de cargar lo más uniformemente toda el área interior de la presa,

y mantenerla sin mayores desniveles, al mismo tiempo que el drenaje del agua de la cola se efectúe hacia las zonas mas alejadas - del tubo de salida. Esto es con el objeto de que la cola en forma líquida al salir del tubo, en su curso hasta el final del embalse, deposite paulatinamente la parte sólida de la misma o material -- aprovechable posteriormente, y sea la parte propiamente líquida, con un porcentaje muy pequeño de partículas sólidas la que salga fuera del embalse. Por esta razón ambos embalses poseen a forma - de aliviadero, una disección del dique en su parte más lejana por donde vierte el agua al exterior. Esta agua posee una cierta cantidad de componentes nocivos en el caso de Moa, lo cual crea de - hecho un problema al contaminar tanto la flora como la fauna. En Nicaro esta agua vierte al mar, en la bahía de Arroyo Blanco, y - en Moa, al río Moa cercano a su desembocadura en el mar.

A manera de ejemplo cabe citar que en Moa, las colas que van hacia la presa contienen 5 - 7 gr/lit de SO_4H_2 libre y aproximadamente 0,1 gr/lit de SH_2 . En este sentido el proyecto de la fábrica no ha resuelto aún el problema de la descontaminación y diariamente se vierten hacia la presa más de 120 Ton de SO_4H_2 y 1,0 - 1,5 Ton de ácido sulfídrico (10).

De lo anterior se desprende no solamente las pérdidas que ocasiona a la economía la cantidad de sustancias químicas de importación que se botan con posibilidades de recuperación, sino además la situación que se crea al contaminar tanto la flora como la fauna. De aquí que podamos decir que el esquema actual usado en la - tecnología de deposición en los dos casos, principalmente Moa, -- crea un peligro latente en la contaminación del medio natural, lo que es necesario evitar a la mayor brevedad posible.

CAPITULO II

PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LAS COLAS DE NICARO Y MOA

Las propiedades físico-mecánicas de las colas analizadas fueron determinadas a partir de la toma de muestras inalteradas, directamente en el terreno mediante monolitos envueltos y parafinados para su conservación posterior, y a partir de muestras alteradas o integrales, representativas, con estructura alterada.

Las mismas fueron tomadas directamente del dique y del embalse - en el caso de Nicaro, y en la presa de Moa, en la zona del embalse a diferentes niveles hasta profundidades de un metro, mediante la excavación de calicotas. A profundidades mayores, la extracción de monolitos hacia las partes centrales del embalse de Nicaro, se hace practicamente imposible el proceso de excavación, dada la consistencia que presenta la cola, blanda-plástica, y -- las muestras así tomadas presentaron alteraciones que afectan su estructura natural.

En lo que sigue, se dan por separado las características físico-mecánicas que fueron estudiadas para las colas de Nicaro primero y luego las de Moa.

2.1 COLAS DE NICARO

2.1.1 GRANULOMETRIA

Se determinó la granulometría de las colas de Nicaro por la vía del tamizado del material, sometiendo a la fracción menor que -- 0.074 mm. (que pasa tamiz # 200 ASTM), a ensayos hidrométricos. En éstos, en todos los casos analizados existe una marcada tendencia a la rápida caída de las partículas, de forma tal que, al cabo de los diez primeros minutos de preparado el ensayo, la densidad que posee la mezcla cola / agua iguala la densidad del -- agua. Este efecto se mantiene incluso para posteriores determinaciones en diferentes tiempos durante el ensayo. El mismo fue demostrado en distintos laboratorios especializados, con diferentes laboratoristas y con el mismo tipo de solución defloculante. Las causas de estas características pueden atribuirse al tipo de constitución mineralógica de las partículas constituyentes, o -- por otro lado a la posibilidad de que las soluciones químicas -- que presentan las colas en su estado natural, pudieran tener algún tipo de reacción con los diferentes tipos de soluciones de -- floculantes empleadas.

Consideramos, por encontrarse fuera del propósito del presente -- trabajo, que lo anterior puede tomarse como punto de partida para futuras investigaciones en este campo.

El rango de granulometría en el cual varían, oscila entre 59% y 36% de contenido de partículas arenosas como valores máximo y mínimo con un valor promedio de 46%, fig. 2.1.1.2

A su vez la fracción arenosa la hemos subdividido de acuerdo a -- la tabla I.

TIPOS	% EN QUE SE ENCUENTRA.	% CORRESPONDIENTE A LA CURVA PROMEDIO
Arena de grano muy grueso	0	0
Arena de grano grueso	0 - 4	2
Arena de grano medio	2 - 11	6
Arena de grano fino	14 - 28	21
Arena de grano muy fino	36 - 59	46

TABLA I.- Contenidos en porciento de los componentes arenosos

De la tabla se deduce que de toda la fracción arenosa que poseen estas colas, más del 30% de la misma está representada por arena de grano muy fino.

El contenido de las partículas limosas en las colas de Nicaro está limitado entre 64% y 41% como valores máximo y mínimo encontrados con un valor promedio de 54%; fig. 2.1.1.2.

Siguiendo en orden decreciente de tamaño, estas colas no exhiben en el ensayo del hidrómetro los componentes arcillosos que poseen por las razones analizadas al principio, aunque se debe -- destacar que en el caso de que existiesen componentes arcillosos sería en una muy pequeña proporción.

Además el resto de las propiedades físicas y mecánicas determinadas demuestran la ausencia de este tipo de partículas.

De todas las determinaciones realizadas, se estableció la figura 2.1.1.1 donde se representan las curvas granulométricas, ocupan-

do la curva superior 36% de arena y 64% de limo, y la inferior - 59% de arena con 41% de limo. Los valores de las curvas superior e inferior no se diferencian grandemente y se pueden comparar. La curva promedio típica para estas colas está dada por 46% de arena y 54% de limo; fig. 2.1.1.2.

2.1.2 HUMEDAD

La humedad natural e higroscópica fue determinada a todas las -- muestras tomadas inmediatamente después de ser extraídas en distintos puntos del embalse y a diferentes profundidades. La época en que fueron extraídas las mismas fue seca, por lo que las precipitaciones no influyeron en este tiempo en el aumento del contenido de humedad. Es decir, las determinaciones de humedad realizadas son naturales y se corresponden con las verdaderas, tanto del embalse como del dique, representativas de tiempos normales en cuanto a condiciones climáticas.

La variación del contenido de humedad "in situ" puede notarse -- claramente en el perfil, aumentando grandemente con la profundidad.

En la superficie del depósito	28,0 %
A 2,00 m. de profundidad	32,0 %
A 4,00 m. de profundidad	36,0 %

Esta regularidad se aprecia de forma general en el perfil del embalse. Por el rumbo o área del mismo las variaciones no se presentan muy grandes, oscilando entre 25 y 30% y solamente se ve un gran aumento en la humedad superficial "in situ", cercano a -

los lugares donde se encuentran ubicados los tubos de salida o -
descarga de las colas al depósito y a los lados del cauce que es
va desarrollando en la medida que define un curso a través del -
depósito. En estos puntos es donde el contenido de humedad se ha
ce muy grande en la superficie, acercándose a valores que son ca
racterísticos de profundidades mayores y el estado físico en que
se encuentran es por tanto fluido-plástico, $B = 0,75$, y semeja
una masa pastosa líquida. Esto se puede comprobar fácilmente ---
cuando comparemos el contenido de humedad de estas partes mayor
que 32% con las correspondientes a 2,00 m. de profundidad, ade -
más, resulta imposible que una persona pueda caminar en un rango
de más o menos 2,00 m. hacia un lado y otro de la dirección del
flujo de colas sin el peligro de hundirse hasta las rodillas; lo
cual fue comprobado accidentalmente durante un proceso de mues -
treo.

En la superficie, las colas representan en sí unos polvos frecuen
temente húmedos con una pequeña costra de solidificación donde se
aprecian grietas de desecación que rompen la superficie de forma
característica, formando mosaicos de dimensiones y formas irregu
lares.

La profundidad a las cuales penetran las grietas puede presentar
diferentes magnitudes, desde unos pocos centímetros, 5-10 cm.; -
hasta 20 cm. en aquellos lugares que han sido mayormente afecta
dos por los efectos de la temperatura cuando están exentas las
precipitaciones. A partir de esta pequeña capa hasta la profundi
dad de 2,00 m. , la cola representa un material con abundante hu
medad algo compacto hasta 4,00 m. de profundidad aproximadamente.

De 4,00 hasta los 6;00 m. aproximadamente, consiste en una masa -
pastosa espesa, de consistencia fluida (consistencia relativa es
aproximadamente $B = 0,75$); ya a partir de esta profundidad la
humedad alcanza límites mayores tomando el aspecto de una pasta -
líquida y su consistencia relativa B, es prácticamente igual o --
muy cercana a 1, lo cual define al mismo como material practica -
mente fluido.

Todo este cuadro presentado para la humedad se ve afectado inme -
diatamente luego de alguna precipitación fuerte, ocasionando au -
mentos considerables de la humedad, creándose lagunas interiores
temporales que en algunas partes o secciones (parte sureste y no -
roeste en su cercanía con el dique) favorecida con los vientos, -
actúa sobre las paredes del dique "colas arriba" socavándolo en -
el pie del mismo. Esto hace que el dique pierda su equilibrio na -
tural y fracturado al mismo tiempo que el agua a buscar su salida
por la fractura, crea grandes grietas a su paso de hasta 3-4 m. -
de profundidad y mayores de 2,00 m. de abertura superficial, a--
rrastrando consigo una gran cantidad de colas que salen fuera ---
del embalse hacia el mar. Tal es el caso presentado actualmente -
en tres secciones del dique en su parte norte. En las mismas se -
encuentra fracturado completamente asociado a grandes grietas que
vienen de las partes centrales del embalse, ensanchándose en su -
salida cuando encuentran al dique por las cuales, cuando ocurre -
alguna precipitación de cualquier magnitud arrastra una masa con -
siderable de materia prima que se pierde irremisiblemente conta -
minando aún más el mar.

2.1.3 PLASTICIDAD

La plasticidad de estas colas la encontramos intimamente relacio-

nada con el contenido de partículas limosas (0,05-0,002 mm. en tamaño), el cual según se vió antes es predominante en las colas en general. Esto da lugar a que la determinación del límite líquido mediante el método de CASAGRANDE fuese prácticamente imposible luego de numerosos e infructuosos intentos. La causa de este fenómeno está relacionada además del gran contenido de partículas limosas, con la tendencia de la misma a experimentar un flujo "instantáneo" cuando con un contenido de humedad apreciable (cerca a su límite líquido, aproximadamente 35% de humedad), es sometido a algún efecto vibratorio o dinámico. Con los primeros golpes de la cápsula contra su base el flujo se hace inminente, cerrándose la ranura previamente realizada a la muestra. Es decir, mediante el equipo diseñado por A. CASAGRANDE, en estas colas no puede definirse el límite líquido.

Mediante el equipo para la determinación del límite líquido diseñado por el investigador ruso VASILIEV, pudieron ser determinados LL que variaron entre 40,4-35,3 %, como valores extremos, para un promedio normativo de 38,7 %, presentando un coeficiente de variación de 0,03.

De igual manera siguiendo el procedimiento clásico se realizaron experiencias para la determinación del límite plástico (LP) los cuales arrojaron valores de 36,8-30,0 % como valores máximo y mínimo respectivamente, estableciendo como valor normativo 34,3 %, con un coeficiente de variación de 0,04.

Los valores extremos del índice de plasticidad, IP determinados se encontraron entre 7,4-3,1 %, el valor promedio normativo fue -

de 4,4 %, con un coeficiente de variación de 0,02. En este sentido, más del 90% de las determinaciones para el IP fueron todas - menor que 7, lo cual, atendiendo a la metodología soviética, sitúa a estas colas como poco o nada plásticas, confirmando de esta forma la composición granulométrica limo-arenosa que presentan.

Se determinó el índice de liquidez B, y los valores que arrojan en la mayoría de los casos inferiores que cero en la superficie de las colas, es decir, humedades naturales menores que los valores de los LP correspondientes, lo cual sitúa a las colas objeto de nuestro estudio como material de consistencia sólida. Esta consistencia se presenta solamente en la superficie debido a la costra de solidificación que se crea en la misma, la cual hace posible el paso por ellas incluso de vehículos pesados (perforadoras, camiones, etc.).

Ahora bien, cuando esta costra se rehumedece, ya sea con el mismo líquido de la cola, o producto de las precipitaciones, los valores de su índice de liquidez se hacen mayor que cero, adquiriendo valores más débiles de la consistencia. A medida que la profundidad aumenta a partir de la superficie, el contenido de humedad se incrementa sobre el valor del LP y el parámetro B toma valores de la consistencia representativos de las profundidades determinadas.

La tabla II da los valores de las propiedades de plasticidad que fueron determinados.

TIPO DE ENSAYO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
LL _v %	16	40,4	35,3	38,7	1,16	0,03
LP %	16	36,8	30,0	34,3	1,37	0,04
LIP %	16	7,4	3,1	4,4	0,09	0,02

TABLA II.- Valores de los parámetros de plasticidad determinados.

(1) No. de determinaciones; (2) Valor mayor del parámetro; (3) Valor menor del parámetro; (4) Valor normativo; (5) Desviación Standard; (6) Coeficiente de variación.

2.1.4 PESO ESPECIFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS, G_s

Para la determinación de este parámetro se ensayaron un total de 60 muestras. La gran dispersión de los valores iniciales, obligó a realizar una cantidad masiva de éstas para obtener un valor índice que caracterizara el peso específico de los granos de sólidos real. La oscilación de los valores se encuentra entre 4,11 y 3,52 como valores máximo y mínimo respectivamente; encontrándose en la gran mayoría de los casos valores que varían entre 3,90 y 4,00. El valor normativo para este índice resultó de 3,81, con una desviación de 0,17, arrojando un coeficiente de variación de 0,04.

Los valores tan alto del peso específico están relacionados con el gran contenido de elementos pesados, fundamentalmente el Fe, cuyo contenido en porcentaje oscila entre 41 y 36%, con un promedio aproximado de 39% en todo el depósito; y el Cr, entre 3 y 1,3%, con un promedio en el yacimiento de 1,6%, además del Ni en mucho menor porcentaje y otros elementos que se hallan combinados

formando óxidos.

Aunque no se ha podido precisar de investigaciones geoquímicas anteriores, la regularidad que presentan los diferentes elementos - que forman la cola por el área del embalse, puede afirmarse que el peso específico variará en función de como sea la distribución o acumulación selectiva de los elementos en diferentes puntos del embalse ; por dos razones fundamentales. La primera consiste en que no existe una metodología a seguir en el cambio de los tubos de salida de la cola hacia el depósito. Estos se varían sin atender a ningún criterio especial en función de como se cargan las colas tratando en todo momento que la parte líquida de las colas se elimine rápidamente hacia el fondo del embalse, hacia el mar, y la segunda es debido a la característica que presentan algunos elementos, y de entre ellos el Ni, de migrar hacia las partes periféricas del depósito cerca del dique en presencia de soluciones amoniacales.

Estas características hacen que el valor del peso específico de los sólidos constituyentes de las colas, lejos de ser una constante, varíe grandemente por toda el área y por el perfil.

2.1.5 DENSIDAD

Se determinaron los pesos volúmetricos tanto a partir de monolitos como de anillos hincados directamente "in situ". Estos consistieron en pesos volumétricos o densidades húmedas γ_f , a los que se les determinó inmediatamente su humedad natural. A partir de ésta se calcularon posteriormente los pesos volumétricos secos o

densidades secas.

El peso volumétrico se registró en numerosos puntos en el interior del depósito abarcando la totalidad del mismo, así como en diferentes puntos a lo largo del dique, en el cuerpo este.

Fueron reportados valores del peso volumétrico húmedo que oscilan entre 2,15 y 1,73 T/M³ como valores máximos y mínimos respectivamente y de pesos volumétricos secos, γ_0 "in situ" cuyos valores extremos máximo y mínimo son de 1,57-1,33 T/M³.

Los datos con relación al peso volumétrico de las colas, en su parte superficial para todo el depósito, en una profundidad de 0,0 - 0,50 m. con sus variaciones correspondientes, para la totalidad de determinaciones realizadas se dan en la siguiente tabla:

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
γ_s	22	2,15	1,73	1,94	0,14	0,07
γ_0	22	1,57	1,33	1,42	0,08	0,06

El orden de las columnas es el mismo que para 2.1.3

2.1.6 INDICE DE POROS

Los valores observados del índice de poros para las colas en sus partes superficiales, determinado por vía indirecta en base al valor del peso específico de los sólidos y al peso volumétrico seco γ_0 se corresponden con materiales de estructura abierta, tomando valores que oscilan entre 1,95-1,47, con valor promedio de 1,68. La desviación fue de 0,13 y el coeficiente de variación de 0,08. Esto parece indicar que como estas colas se encuentran prácticamente no consolidadas, o están normalmente consolidadas en su superfi

cio, el agua que se encuentra entre sus partículas separa éstas - creando una estructura abierta en las colas.

Estos valores del índice de poros caracterizan toda la superficie de la presa y principalmente en las áreas donde las colas se encuentran representadas mayormente por partículas muy finas (mitad W de la presa), alejadas de los tubos de salida de la cola, donde producto de la transportación de las mismas en medio líquido en -- encuentran aquí su deposición.

2.1.7 GRADO DE SATURACION

En las partes superficiales del embalse, el grado de saturación -- varía en la medida de que se presenten situaciones de índole local. Tal es el caso de las precipitaciones en la zona del embalse, lo -- que trae acarreado acumulaciones de agua en forma de lagunas interiores. Mientras esto ocurre, la superficie de las colas se encuentra totalmente saturada en la zona de acumulación hasta su total evaporación.

Esto no es una situación frecuente por lo que generalmente en la -- superficie del depósito el grado de saturación de las colas se -- presenta con pocas variaciones y sus valores normales oscilan en -- tre 60 y 69%, que arroja un valor promedio de 66%. Se encuentra -- que determinadas zonas del embalse, debido a la variación de la -- humedad, la saturación es total variando entre 94-100%, encontrándose entonces el material saturado en la superficie del depósito. Estas variaciones pueden notarse en la parte central del yacimien -- to y hacia la parte mas lejana del mismo situada al W, por donde

se descarga el componente líquido hacia fuera del embalse; además de la zona del curso de las colas a partir del tubo de salida en una faja de más o menos 2,00 m. hacia un lado y otro del mismo.

El grado de saturación puede aumentar en cualquier momento debido a las precipitaciones y saturar completamente todo el embalse. Esto constituye un estado crítico en la vida del mismo, de presentarse un agente dinámico o sismo que movilice toda la masa de las colas al generar altas presiones de poro y pueden experimentar licuación. Se hace necesario pues evitar un estado de este tipo en la presa, en previsión de este fenómeno.

2.1.6 CONSOLIDACION

La consolidación de las colas de Nicaro resulta un tema particularmente importante. Al hablar de ella es necesario relacionar el fenómeno verdadero de la consolidación de los suelos con el que se experimenta en estas colas.

En los suelos, en dependencia de su composición granulométrica y mineralógica se consolidarán naturalmente bajo cargas debidas a peso propio u otro fenómeno, lenta o rápidamente. Cuando el suelo esté compuesto por partículas arcillosas y además saturado, el proceso tardará mucho mas tiempo que si el mismo suelo estuviese constituido por partículas arenosas o limosas. En las colas de Nicaro el proceso de estructuración o formación de sus enlaces ocurre lentamente, presentando su influencia la sobrecarga que se acumula sobre ellas en el tiempo.

En el estudio de la consolidación en las colas de Nicaro partimos

de dos esquemas de ensayo y con los resultados de los mismos es establecer una comparación. Uno consistía de ensayar directamente con monolitos, y el otro a partir de muestras remodeladas luego de ser reproducidas las condiciones de campo en cuanto a densidad y humedad, no en estructura, mediante compactación estática. El resultado de las mismas en ambos casos resultó diferente.

Comparación entre ambas.-

Los valores arrojados en los ensayos de consolidación con muestras remodeladas fueron totalmente diferentes a los arrojados por los monolitos, según se aprecia en la figura 2.1.8.1. Las muestras remodeladas mostraron una mayor deformación bajo el efecto de las cargas que los monolitos. Estas presentaron deformaciones totales s' , que oscilaron entre 0,10 y 0,14 cm., para las muestras remodeladas y entre 0,046 y 0,065 cm. para los monolitos, -- fig. 2.1.8.1, bajo el efecto de las presiones finales de estabilización de 3 kg/cm^2 y 4 kg/cm^2 respectivamente. Al consolidarse bajo estas presiones experimentan la máxima deformación sujeta a carga. De aquí que podamos inferir que la deformación que experimentan las muestras de cola con su estructura natural (monolitos), es mucho menor que cuando se le remodela, aunque presenten iguales condiciones de densidad y humedad. Por esta razón los parámetros de deformación obtenidos de los ensayos de consolidación no son representativos a partir de muestras previamente remodeladas para estas colas, porque los defectos estructurales que pueden presentar las mismas, se hacen notorios, incluso a muy bajas presiones.

Los valores máximo y mínimo arrojados por el coeficiente de -- compresibilidad A_v , el módulo de deformación edométrico E_s y los coeficientes de cambio volumétrico M_v de los ensayos con monolitos con bajas presiones aplicadas hasta $0,5 \text{ kg/cm}^2$, experimentan una gran deformación: $A_v = 0,2-0,08 \text{ cm}^2/\text{kg}$, $E_s = 30-12 \text{ kg/cm}^2$, -- $M_v = 0,092-0,034 \text{ cm}^2/\text{kg}$. Para presiones normales que sobrepasan 1 kg/cm^2 y hasta 4 kg/cm^2 , los índices varían, adquiriendo una menor compresibilidad: $A_v = 0,03-0,02 \text{ cm}^2/\text{kg}$, $E_s = 120-77 \text{ kg/cm}^2$ $M_v = 0,013-0,008 \text{ cm}^2/\text{kg}$.

En sentido general existe una tendencia de las colas, de presentar mucha compresibilidad con bajas presiones, sin embargo con el mismo tiempo de aplicación de las cargas, según ellas se aumentan hay poca tendencia a la reducción de las deformaciones, resultando medianamente compresibles. Esto se debe a que como se trata de material semi-saturado (S_r entre 60 y 69%), el grado de consolidación inicial que presentan es grande producto de la expulsión del aire que contienen.

El hecho de que estas colas se consoliden mucho más con mayor compresibilidad para cargas pequeñas, con tiempo de aplicación prolongado mayor de 24 horas, se debe a que con bajas presiones entre $0,1$ y $0,2 \text{ kg/cm}^2$, las colas comienzan el proceso de la ruptura de los enlaces estructurales que las unen por expulsión del aire y a partir de aquí es que comienza el proceso de consolidación propiamente dicho o consolidación con filtración cuando el S_r alcanza el 100%. Este límite puede apreciarse a partir de dos ensayos con estas presiones bajas, donde aproximadamente a la presión de

0,15 kg/cm² se nota claramente el quiebre de la curva, señalando de esta forma la presión que da inicio al proceso de consolidación con filtración, en las colas o presión estructural. Fig. -- 2.1.8.2.

Se realizó el cálculo del coeficiente de consolidación C_v , y los valores que éste arrojó resultaron erráticos con relación a las presiones ya que estas colas se encontraban parcialmente saturadas, no ajustándose a la teoría de Terzaghi, que plantea saturación completa. Por esta razón no se da la dependencia de C_v con relación a las presiones. De la misma manera sucedió con el coeficiente de permeabilidad K .

2.1.9 RESISTENCIA AL CORTANTE.

Como resultado de los análisis realizados con el fin de determinar la resistencia al esfuerzo cortante de las colas, que incluyeron ensayos en aparatos de corte directo y en equipos triaxial, se obtuvieron distintos tipos de envolventes. Estos los relacionaremos por separado en el siguiente orden: Ensayos rápidos de corte directo, ensayos lentos de corte directo y ensayos rápidos en----- equipo triaxial. Las muestras de cola tomadas para la realización de estos ensayos, consistieron en muestras integrales tomadas en sacos de diferentes secciones del dique y del embalse, de los cuales se tomó previamente su densidad y su humedad natural, reproducidas luego en el laboratorio mediante compactación estática, las cuales en todos los casos pudieron relacionarse usando los patrones de humedad y densidad seca; además se tomaron monolitos en zona del embalse en las cercanías del tubo actual de descarga de -- las colas en el depósito.

Al mismo tiempo la realización de ensayos siguiendo los cuatro esquemas arriba mencionados con los dos tipos de muestras, nos permitió establecer una comparación que incluye los inconvenientes -- que trae consigo uno de ellos, y al mismo tiempo tener mayores posibilidades en el manejo de los datos de diseño para el cálculo -- de estabilidad de la presa actual.

Ensayos rápidos en equipo de corte directo.-

Estos se realizaron para muestras remoldeadas luego de reproducir las condiciones de campo, solamente en humedad y densidad, en la misma caja de corte y fuera de ella, preparando primeramente una muestra e introduciéndola luego en la caja de corte. A estas le -- llamaremos colas remoldeadas. Paralelamente se realizaron ensayos

de corte con monolitos con estructura natural.

Ensayos rápidos en colas remoldeadas.-

Las muestras se rompieron mediante un equipo de corte inglés, -- Wykeham Farrance Eng. LTD, a lo largo de un plano definido de corte, con cargas de 0,5; 1 y 3,0 kg/cm² con una velocidad en el -- corte de 0,183 mm/min (0,0072 "/min). El corte le fue aplicado a 9 muestras independientes, de cada una de las cuales se prepararon 3 anillos de corte para un total de 27 cortes, de los cuales despreciamos 6.

Con carga vertical de 0,5 kg/cm², las \bar{z} se encontraron entre 0,20 y 0,51 kg/cm² como valores extremos; con 1,0 kg/cm² oscilaron entre 0,56 y 0,81 kg/cm²; y para 3,0 kg/cm² de carga normal, entre 1,26 y 1,89 kg/cm². Con todos los valores de la resistencia al -- cortante para este esquema se establecieron los valores de c y ϕ , normativos y de cálculo para diferentes probabilidades que aparecen en la tabla siguiente:

TIPO DE ENSAYO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Rápido	ϕ	27	26	24,6	24,2	23,6	22,5	0,13	-	-
Remoldeado	$tg\phi$	27	0,49	0,46	0,45	0,44	0,41	0,13	0,03	0,06
Sutura do	c	27	0,16	0,10	0,086	0,065	0,021	0,13	0,053	0,34

Donde: (2) No. de ensayos, (3) Valor normativo, (4) Valor de cálculo para una probabilidad del 85%, (5) Valor de cálculo para una probabilidad del 90%, (6) Valor de cálculo para una probabilidad del 95%, (7) Valor de cálculo para una probabilidad del 99%, (8) Desviación standard del cortante -- (σ_z), (9) Desviación standard del coeficiente de fricción y de la cohesión ($\sigma_{tg\phi}$, σ_c), (10) Coeficiente de variación,

$$V_c = \frac{\sigma_c}{A_{nc}} \quad \text{y} \quad V_{tg\phi} = \frac{\sigma_{tg\phi}}{A_{ntg\phi}}$$

El valor del coeficiente de variación para la cohesión, nos advierte de una gran dispersión en los valores calculados para este índice. Teniendo en cuenta ésto lo manejaremos con mucho cuidado.

Individualmente para cada muestra se determinaron sus respectivas envolventes por vía gráfica y analítica, mediante mínimos cuadrados, así como las curvas tensión contra deformación por cortante correspondientes a cada carga normal, σ .

Se observa en el comportamiento de estas colas a partir de las -- curvas tensión-deformación, que el tipo de falla característica -- responde a falla frágil comparable a la de suelos arenosos y limos (Secc. 2.1.1). Esta tendencia prevalece para la mayoría de -- los cortes realizados con diferentes magnitudes de cargas verticales, y muy poco frecuente se presenta el tipo de falla progresiva o plástica, típica de suelos de otra constitución. Se dan en las figuras 2.1.9.1 y 2.1.9.2 esta tendencia para 2 muestras.

El primer tipo de falla enunciado arriba es el representativo para estas colas; no obstante es necesario comentar un poco lo anterior.

En los suelos generalmente cuando son sometidos a ensayos de corte, siempre que su composición granulométrica sea representativa de arenas con cierto grado de compacidad, en la medida que esta -- última sea mayor, se destacará mas la caída de la curva tensión-deformación, que será en forma brusca indicando falla frágil y -- a partir del momento de corte su deformación, luego de fallar, se aumentará permaneciendo mas o menos constante su resistencia -- al corte residual.

En el caso de las colas objeto de nuestro análisis, las curvas -
presentan un "pico" muy bien definido en algunas de las muestras,
fig. 2.1.9.1, no obstante en otras existe la tendencia de una di-
minución paulatina y muy lenta de la resistencia al cortante, --
fig. 2.1.9.2, y en otras a mantenerse prácticamente constante con
un aumento progresivo de la deformación por cortante. Esto último
se debe a que la compacidad que presentan las colas, no correspon-
de en realidad con un valor alto, pudiéndose explicar la compaci-
dad por una parte debido a su alto contenido de humedad, y consi-
guientemente a la tendencia experimentada por éstas a fluir plás-
ticamente para condiciones de humedad cercanas a sus LL o mayores
y por otra parte al tiempo de consolidación de las mismas, que se-
gún los datos de las consolidaciones, prácticamente éstas demoran
largo tiempo bajo el peso propio de las colas.

Por esta razón podemos precisar el estado de compacidad que presen-
tan, es como el intermedio entre el correspondiente a una arena den-
sa y una arena suelta.

Como vemos, la característica mecánica de predominio la constitu-
ye el ángulo de fricción entre las partículas, y por tanto el máxi-
mo responsable en su resistencia al cortante. La cohesión juega -
en este caso un papel secundario, más aún, cuando los bajos valo-
res que presentan fueron logrados para una velocidad muy rápida -
en el equipo, pudiendo inferir además que en gran medida esta co-
hesión puede resultar "aparente", debido al elevado grado de hume-
dad y una pequeña parte a la que representa propiamente el mate-
rial.

Además hay poca representatividad en el valor de las mismas como

se deduce de la tabla por el alto valor del coeficiente de variación.

En la figura 2.1.9.3, se dan las dependencias de σ vs ϵ para cada uno de los ensayos de corte directo realizados en varias -- muestras, calculadas por vía analítica mediante mínimos cuadrados que nos dan la envolvente recta de menor adaptación, además se sitúa la envolvente promedio como representativa de todas las muestras.

Ensayos lentos en colas remoldeadas.--

Como resultado de los ensayos de corte lento saturado que se realizaron en el mismo equipo de corte inglés, que trabaja a deformación controlada al cual le impusimos una velocidad de corte -- lenta de 0,0365 mm/min, se obtuvieron las envolventes que aparecen en la figura 2.1.9.4 con 7 muestras de cola con estructura remoldeada para un total de 21 cortes, y en misma figura la curva promedio analítica calculada mediante mínimos cuadrados.

Del comportamiento observado de las mismas se puede comentar lo siguiente:

Si conocemos que la composición granulométrica que poseen estas -- colas, son limosas y que aparentemente no presentan dentro de su composición mineralógica componentes finos arcillosos que posean algún tipo de actividad físico-química que pudiere influir en los valores de su solidez mecánica mediante una pequeña cohesión para un cierto contenido de humedad, podemos observar como en su comportamiento tensión-deformación cortante, no se destaca ningún tipo (con la sola excepción de la muestra 7), de fractura frágil ---

(figura 2.1.9.5) y todas son de tipo progresivo (en la figura - 2.1.9.6 se destaca este comportamiento en la muestra M-2, que es común a todas las demás), como si parecieren corresponder a tipos de colas con alto contenido de partículas arcillosas (inferiores a 0,002 mm). Es decir, la tensión cortante se mantiene constante al final del "corte", aumentando progresivamente las deformaciones para cualquier presión normal aplicada entre 0,5 y 3 kg/cm².

Por otra parte, teniendo en cuenta que luego de preparar convenientemente la muestra en el mismo anillo de ensayo de corte, reproduciéndole sus condiciones de campo (en γ_0 y w_{nat}) mediante compactación estática, le es impuesta la carga normal dejando que ésta actúe hasta que no se produzcan disminuciones del volumen por deformación debido a la carga, y lentamente es efectuado el corte, no debiera existir ningún tipo de movilización interna de la muestra para que ésta no rompa frágilmente en este material específico. Esto lógicamente resulta contradictorio para estas colas.

Para explicar este fenómeno así como prever los esquemas necesarios a tomar en cuenta para observar el que pudiera ser el "comportamiento representativo" (ésto es hipótesis, porque el comportamiento que exhibe puede ser el real y que a mayor esfuerzo cortante, puedan experimentar falla frágil con densidades pequeñas) del material teniendo en cuenta nuestros ensayos de corte, independientemente de que la muestra se encuentre remodelada, sin estructuración en este caso posee poca influencia en cuanto a su sensibilidad durante el corte, cosa que fue totalmente demostrada en ensayos realizados con monolitos con estructura natural, en los -

cuales tampoco se presentó el caso contrario, es decir falla frágil, lo cual quiere decir que la actividad físico-química que puede presentar es pobre (esto tiene aún que demostrarse claramente - para poder afirmarlo, aunque inferimos esto por los valores observados de las distribuciones granulométricas donde no se aprecian partículas menores que 0,002 mm), y lo que si pudiera influir de forma directa en su comportamiento a la falla, es la magnitud de su densidad seca. En el caso de la muestra 7 anteriormente citado se ve claramente que de todas las muestras analizadas, es la que mayor densidad seca presenta ($\gamma_0 = 1,63 \text{ T/m}^3$), el resto exhiben valores inferiores a este. En el futuro deberán realizarse ensayos de este tipo utilizando aquellas muestras que presenten altas γ_0 y en ese caso verificar lo antes expuesto.

Los parámetros de resistencia determinados por esta vía para la cohesión, todos fueron 0, y el ángulo de fricción interna osciló entre 39° para la M-2 y 27° para la M-7 como valores extremos mayor y menor respectivamente.

La resistencia al cortante por este esquema, tomó valores para 0,5 kg/cm² de presión normal aplicada, de entre 0,31 y 0,19 kg/cm² como valores mayor y menor respectivamente; con 1,0 kg/cm² de carga normal, las τ_c oscilaron entre 0,59 y 0,45 kg/cm² como valores extremos, y para 3,0 kg/cm² de presión normal entre 1,75 y 1,58 kg/cm². Como se ve, los datos son muy cerrados en ese entorno que comprueba la precisión de las determinaciones.

Los valores normativos y de cálculo para diferentes probabilidades se dan en la siguiente tabla:

TIPO DE ENSAYO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Corte ϕ	21	29,0	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	0,01	-	-
lento $\gamma\phi$	21	0,556	0,553	0,553	0,552	0,550	0,550	0,01	0,002	0,004
saturado c'	21	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0

La numeración de las columnas se corresponde con la tabla de la Página 34.

De la tabla anterior se deduce que la desviación que experimentó el cortante fue infima, por tal razón tomamos inicialmente como valores de diseño para estudiar la estabilidad del dique de la presa, los arrojados por los ensayos del cortante lento saturado; es decir $\phi = 29^\circ$ y $c = 0$, trabajando para una probabilidad confiable del 99%. Estos luego fueron variados atendiendo a diferentes condicionales que aparecen en el capítulo IV.

Ensayos rápidos con estructura natural (monolitos).-

Los ensayos de cortante con monolitos se realizaron en el mismo equipo citado anteriormente, trabajando a deformación controlada con una velocidad rápida de corte; las muestras rompieron mostrando un valor pequeño de cohesión, semejante al de las muestras con estructura perturbada. El tiempo total que fue necesario emplear para romper cada muestra fue aproximadamente igual a 3 min., a partir de este momento comenzaban a manifestar un aumento creciente de la deformación por cortante debido al avance del equipo, permaneciendo constante la resistencia al corte.

Como se ve el efecto que presenta la estructura natural de las costras de Nicaro en su resistencia al corte, puede compararse al de

muestras del mismo material con estructura perturbada, o sea, en sus condiciones de resistencia, no así en sus propiedades deformativas donde el efecto se hace notorio, según se aprecia en la fig. 2.1.8.1, en la cual la diferencia en deformaciones observado por las curvas s vs σ' es grande.

De las experiencias con monolitos de cola según este esquema de ensayo, se observó que en todos los casos, el equipo realizó su recorrido completo, de 1 cm en dirección horizontal. El corte no se logró debido al predominio de la deformación sobre el corte, bajo presiones normales que variaron entre 0,5 y 2,0 kg/cm², fig. 2.1.9.7. La figura anterior caracteriza los tipos de deformación por cortante para una muestra, siendo igual el comportamiento en todas las demás determinadas por este esquema.

El valor del ángulo de fricción interna osciló entre 36,4° - 31,7°, y el valor promedio de 33,9°, y para la cohesión 0,07 kg/cm², - fig. 2.1.9.8.

Los valores extremos de la resistencia al corte τ , menor y mayor respectivamente, para 0,5 kg/cm² de presión normal son de 0,34 - 0,49 kg/cm²; para 1,0 kg/cm², 0,69 - 0,74 kg/cm² y para 2,0 - - kg/cm², 1,31 - 1,58 kg/cm².

Los datos normativos y de cálculo para los parámetros de resistencia por este esquema de ensayo, aparecen en la siguiente tabla:

TIPO DE ENSAYO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
CORTE	ϕ	12	33,9	31,7	31,1	30,2	28	-	-	-
RAPIDO	$tg\phi$	12	0,673	0,62	0,60	0,58	0,53	0,09	0,049	0,074
EN	c	12	0	0	0	0	0	-	0,657	0
MONOLITOS										

Donde la numeración de las columnas es la misma que la de las páginas 34 y 40.

De todos los cortes efectuados fueron despreciados 3 por observar un valor exagerado de la cohesión.

Ensayos rápidos en triaxial con estructura natural.-

Estos ensayos fueron realizados en muestras inalteradas, empleando un equipo de compresión triaxial, creando la presión lateral o de cámara σ_3 con agua, sin dejar que la muestra consolidara. Para esta presión aplicada, se le dió el esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) con una velocidad de avance del pistón de 0,004 plg/min (0,00017 cm/seg) y en todos los casos se observó una cohesión de 0,94 kg/cm² y - - 19,7° de ángulo de fricción interna (calculado).

Para este tipo de ensayo se elaboraron las relaciones tensión-deformación, fig. 2.1.9.9, en las cuales se nota claramente la caída de las mismas para todos los rangos de presiones normales (esfuerzo desviador) aplicados, que oscilaron entre 0,76 y 6,27 kg/cm² correspondientes a las presiones de cámara σ_3 , que fueron entre 0,5 y 3,18 kg/cm². Esto indica que el comportamiento a la falla se destaca de forma precisa independientemente que se trate de una prueba triaxial, lo cual es característico en ella para este tipo de muestras idem a los suelos corrientes.

Si comparamos el intervalo del desviador a los cuales falló la muestra por su plano característico siguiendo este esquema, con el intervalo de presiones por el esquema de corte directo rápido (para todos los casos de muestras remoldeadas y monolitos), vemos -- que éstos no son similares..

La envolvente conseguida para el triaxial rápido, arrojó valores de $0,96 \text{ kg/cm}^2$ para la cohesión y de $19,7$ para el ángulo de - - fricción interna, figura 2.1.9.10.

3.1 COLAS DE MOA

3.1.1 GRANULOMETRIA

Las colas de la planta de Moa, que presentan una fuerte coloración roja, reproducen un fenómeno semejante al de las colas de Nicaro - con relación a su granulometría. Este fenómeno está representado - por los valores de las lecturas del hidrómetro que, cuando la mez - cla suelo y agua y solución defloculante comienza a sedimentar en la probeta de ensayo, al cabo de los 6 primeros minutos en la mayo - ría de los casos analizados, ya esta mezcla iguala a la densidad - del agua ($1,00 \text{ gr/cm}^3$). La explicación de este fenómeno se dió en la sección de granulometría de las colas de Nicaro, (3.1.1).

En la figura 3.1.1.1, se representan las curvas granulométricas de estas colas de un total de 26 determinaciones realizadas. Se nota en las mismas que el intervalo en el cual varían no es amplio si - se tiene en cuenta la gradación selectiva que van tomando las co - las en el embalse, y que las muestras ensayadas en unos casos si - guen el curso del canal abierto por las colas a partir de su sali - da y en otros corresponden a otros puntos del embalse.

Las partículas arenosas se representan a partir de los ensayos en es - tas colas por un rango variable de 27% - 14%, para un promedio de 20%; figura 3.1.1.2.

Esta fricción arenosa la subdividimos a su vez en:

FRACCION	% EN QUE SE ENCUENTRA	% CORRESPONDIENTE A LA CURVA PROMEDIO
Arena de grano muy grueso	0	0
Arena de grano grueso	1 - 5	2,5

FRACCION	% EN QUE SE ENCUENTRA	% CORRESPONDIENTE A LA CURVA PROMEDIO
Arena de grano <i>medio</i>	2 - 12	6
Arena de grano fino	4 - 17	10,5
Arena de grano muy fino	14 - 27	20

Nótese que de toda la fracción arenosa que posee, más del 70% consiste en arena de grano muy fino.

La fracción limosa está representada en estas colas, por contenidos que oscilan entre 86 - 73% como valor máximo y mínimo respectivamente; con un valor promedio de 80%. Constituyen la fracción de predominio y alcanzan valores muy superiores a los exhibidos por las colas de Nicaro.

Igual que las colas de Nicaro, en ninguna de las determinaciones -- efectuadas se detectó la presencia de partículas arcillosas (menores que 0,002 mm), por lo rápido de la sedimentación. Creemos que las mismas, de encontrarse presentes como vimos para el caso de las colas de Nicaro, sería en muy pequeña proporción, quizás algo mayor en las de Moa.

En la figura 3.1.1.2 se establecen la curva granulométrica de los valores máximos con 14% de arena y 86% de limo, la de los valores mínimos con 27% de arena y 73% de limo, y la curva promedio representativa con 20% de arena y 80% de limo.

3.1.2. HUMEDAD NATURAL.

Se determinaron las humedades naturales en diferentes épocas secas, en distintos puntos en el interior de la presa y siguiendo el curso de la pulpa, abarcando toda el área de la misma. La variación en los valores de la humedad no es grande, tal como puede verse en la

tabla resumen, y las profundidades a las que fueron tomadas se -
encontró entre 0 - 1,0 m. Los valores máximos y mínimos encontra-
dos fueron de 35,3 y 29,4 % respectivamente, como resultado de 42
determinaciones.

En las partes superficiales del depósito se presentan estas colas
como un material compacto cuando está seco, y crea una costra de
solidificación de aproximadamente 20 cm, formando grietas de dese-
cación poco profundas en forma de cuñas de 10 - 20 cm de profundi-
dad, cuarteando la superficie de las colas.

La disminución de volumen que presentan al secarse es grande, - -
aproximadamente el 10 %, en anillos de 31 cm² de área; por eso en
la superficie ocurren las grietas producto de las temperaturas.

En la profundidad, este depósito es muy reciente aún y la canti-
dad de cola que posee actualmente es muy poca y no supera los - -
2,00 m en todo el embalse.

A esta profundidad el valor que presenta la humedad higroscópica
es algo mayor de 35% solamente, permaneciendo en un estado fluido
en un período muy largo de tiempo, incluso años. El valor del ín-
dice de líquidos B, en todos los casos para las muestras ensayadas
es mayor que la unidad, lo que implica que la consistencia en es-
te tipo de colas sea fluida a 2,00 m de profundidad. Esto es ca-
racterístico para suelos limosos que presenten un alto contenido
de humedad, como en este caso.

A estas colas se le determinó la reducción de volumen o retracción
con anillos usados en los ensayos de consolidación de diferentes -

áreas a partir de los monolitos y su valor resultó alto. Con anillos de 19cm^2 de área fue de 8,7% como promedio, y de 31cm^2 de 5,2%. Es decir, en estas colas el efecto de la pérdida de agua es considerable bajo la influencia de la temperatura experimentando una retracción muy alta. Con la pérdida de la humedad por efecto de la temperatura, estas colas se endurecen notablemente adquiriendo una gran consistencia, y B puede alcanzar valores menores que -5, lo cual hace muy estable las colas por aumento de su resistencia y disminución de la compresibilidad. La costra de solidificación que se crea en la superficie, en las partes mayormente expuestas, es tan estable que hace posible el tránsito sobre ellas sin experimentar deformaciones.

Estas colas no presentan hinchamiento y son muy poco o nada hinchables.

El promedio normativo de la humedad para estas colas en todo el embalse en sus partes superficiales, exceptuando la costra de solidificación, hasta 1,0 m de profundidad, es de 32,8%, presentando una desviación de 1,56, para un coeficiente de variación de 0,05. Este último valor justifica que la humedad en todo el embalse puede usarse como dato con buen grado de confiabilidad.

3.1.3 PLASTICIDAD.

Se realizaron ensayos de plasticidad correspondientes a la determinación de los límites líquido y plástico de éstas, así como el índice de plasticidad expresado por la diferencia entre los límites antes mencionados

Se les determinó el LL tanto por el método de CASAGRANDE como por VASILIEV, arrojando los valores que aparecen en la tabla siguiente con sus valores normativos, sus desviaciones y sus coeficientes de variación:

		NUMERO DETERM.	VALOR MAXIMO	VALOR MINIMO	PROMEDIO NORMATIVO	DESVIA CION STANDARD	COEF. VARIA CION
LL	METODO CASAGRANDE	$\frac{8-3}{5}$	25	23	24	0,70	0,03
	METODO VASILIEV	$\frac{14-1}{13}$	36	26	32	3,33	0,10
LP	METODO CASAGRANDE	$\frac{8-3}{5}$	24	21	22	1,97	0,05
	METODO VASILIEV	$\frac{14-1}{13}$	29	18	22	3,0	0,14
IP	METODO CASAGRANDE	$\frac{8-3}{5}$	2	1	2	0,45	0,25
	METODO VASILIEV	$\frac{14-1}{13}$	12	6	9	2,10	0,22

La diferencia encontrada entre los LL por vía de CASAGRANDE y VASILIEV, resultan mayores valores para estos últimos, semejante a los suelos corrientes.

Por el Método de Casagrande la plasticidad que presentan es poca, IP menor que 7, y por el Método de Vasiliev la plasticidad es mayor IP mayor que 7, según arrojan los valores normativos de la tabla anterior. Esto indica que para estas colas existe una ligera plasticidad si fijamos como buenos los valores del IP referidos al Método de Vasiliev. Este método da generalmente valores mayores del LL para los suelos corrientes, que el Método de Casagrande. En el caso de las colas de Moa sucede semejante dentro de los rangos de plasticidad.

dad observados.

Nótese de la tabla que las mayores dispersiones las encontramos relacionadas con el IP (por ambos métodos de ensayo), cuyos coeficientes de variación sobrepasan la norma para el mismo. Sin embargo las diferencias entre los valores mayores y menores del IP calculados por Casagrande son ínfimas. Por ello la razón de las variaciones, puede deberse al número de ensayos.

Estableciendo una comparación entre los IP de estas colas con las de Nicaro, tomando como base los mismos por el Método de Vasiliev, los primeros exhiben mayor plasticidad (9% los de Moa y 4% los de Nicaro. Esta particularidad es notable, por otra parte en la descripción tacto-visual de estos materiales donde resultan mas plásticas las de Moa.

Los índices de liquidez se pueden comparar con los de Nicaro. En la superficie del embalse, en su costra de solidificación, presentan consistencia dura, debido a la pérdida de humedad por desecación. A mayor profundidad, puede notarse que los valores del LP, siempre resultan inferiores a los de la humedad natural y su consistencia se hace más débil.

La costra de solidificación que se crea en las colas de Moa es mucho mas dura que las de Nicaro. Esto es, al secarse muestras iguales de colas de Nicaro y Moa, las primeras, cuando pierden completa o parcialmente su humedad, disgrega su estructura, semejante al comportamiento de arenas; mientras que las segundas cierran su estructura formándose terrones monolíticos de consistencia muy dura.

Teniendo en cuenta ésto recomendamos, con la continuación de es-

tas investigaciones, la determinación de los componentes finos - plásticos que pueden contener estas colas de Moa, que aparente - mente se encuentran en mayor proporción que en las colas de Nica - ro, por el comportamiento anteriormente señalado.

Esto acentuaría aún más el efecto que estas partículas traerían - en las propiedades cohesivas del material y poder partir de da - tos más seguros a los efectos del diseño de la cortina con estos propios materiales, así como las inclinaciones máximas de sus ta - ludes y alturas.

3.1.4 PESO ESPECIFICO RELATIVO DE LOS SOLIDOS

Para la determinación del mismo fueron efectuados 56 ensayos. Pre - sentan altos valores de este índice que varía entre 3,99 y 3,77 como valores máximo y mínimo respectivamente. De estas 56 determi - naciones, 44 se encuentran por encima de 3,90.

El valor promedio normativo que arroja este índice para todo el - embalse es de 3,91; con una desviación standard de 0,06, para un coeficiente de variación de 0,015.

A diferencia del depósito de las colas de Nicaro, éstas no pare - cen presentar migración selectiva de sus elementos en soluciones ácidas, por esta causa no se aprecia una dispersión amplia en los pesos específicos y su valor prácticamente se presenta con pocas variaciones para el depósito completo.

Por otra parte, estas variaciones son producto de la forma en que se depositan las colas en el embalse, tal como se comentó en el - caso de Nicaro; y los altos valores del peso específico se deben al alto contenido de elementos pesados, fundamentalmente el Fe, -

que se encuentra en el orden del 40%.

3.1.5. DENSIDAD

Tal como se vió de la humedad cuyo valor encontrado no faría en - un rango muy amplio, éste resulta semejante, no presentando varia- ciones considerables en toda el área de depósito. Se determinó la densidad húmeda, γ_f directamente "in situ" mediante anillos mues- treadores hincados estáticamente. Se registró ésta en 20 puntos en el interior del embalse, y osciló entre 2,23 y 2,38 T/m³; así co- mo la densidad seca, γ_d , determinada a partir de ésta, oscila en- tre 1,67 y 1,83 T/m³.

En la siguien te tabla puede verse la variación de las mismas:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
γ_f	20	2,38	2,23	2,29	0,03	0,02
γ_d	20	1,83	1,67	1,73	0,04	0,02
w	42	35,3	29,4	32,8	1,56	0,05

(1) Nombre del parámetro (γ_f .-Peso volumétrico húmedo en T/m³; γ_d .- Peso volumétrico seco en T/m³; w .- Humedad en %) (2) Número máximo de determinaciones; (3) Valor máximo del índice; (4) Valor mínimo del índice; (5) Promedio normativo (6) Desviación standard; (7) Coeficiente de variación

La densidad seca y húmeda de estas colas comparadas con las de Ni- care como se vé, es mucho más alta, tanto que el valor menor de las mismas para las de Moa, es mucho mayor que los valores mayores que exhiben las de Nicaro, tanto para la densidad seca como la húmeda. Nótese que la variación de la humedad en las colas de Moa son seme- jantes a las de Nicaro y que además el índice de poros en estas úl- timas es mayor.

3.1.6. INDICE DE POROS

Se encuentra oscilando entre 1,15 y 1,35 , presentando un valor medio de 1,27. Presentan una desviación de 0,05 y un coeficiente de variación de 0,04. Los valores determinados para este índice sitúa a estas colas en magnitud, por debajo del observado en las colas de Nicaro, en las cuales el valor menor (1,47) es mayor que el máximo observado en Moa. Esto indica que el empaquetamiento es estructural que poseen las colas de Moa, es mucho más compacto que el que presentan las de Nicaro; es decir, presentan una estructura menos abierta.

Esta particularidad se acentúa con mayor fuerza en la compresibilidad y las colas Nicaro son por esta razón más compresibles que las de Moa. Sin embargo, no presenta mucha influencia en la resistencia a cortante, donde los resultados son similares.

3.1.7. GRADO DE SATURACION

De acuerdo a los valores que presentan las colas del peso específico relativo de los sólidos, a su humedad y el índice de poros correspondiente a cada muestra, se determinó el grado de saturación, arrojando en todos los casos valores entre 96 - 100% de saturación.

Las mismas pueden considerarse en un estado de saturación completa en todo el embalse, lo cual es característico.

3.1.8. CONSOLIDACION

Se efectuaron ensayos de consolidación de monolitos tomados en la dirección del curso de la cola líquida, con humedad natural cons-

tante, saturados con agua natural y con agua de la propia cola de su medio natural. Se pudo establecer que no existe diferencia en compactamiento bajo cargas para ambos tipos de agua (M-1), dado por la coincidencia en las curvas asiento relativo s' vs presión, fig. 3.1.8.1, y de la misma figura existe muy poca diferencia entre casos de las muestras M-2, ensayadas con su humedad natural constante y saturada con agua de la cola.

El proceso de consolidación en estas colas se produce más lentamente que en las colas de Nicaro, que como yasse apuntó en 2.1.8, el grado de consolidación inicial que se produce es mayor debido a la condición de saturación que presentan, es decir, parcialmente saturadas. Puede esto atribuirse entonces a que las colas de Mos se encuentran completamente saturadas desde la superficie, y el porcentaje de partículas finas aquí es mayor que en Nicaro, -- prácticamente el doble. Véase sección 2.1.1 y 3.1.1. Recordar que el grado de saturación de las colas de Nicaro varía entre 60 -69%. Los ensayos de consolidación en estas colas se realizaron con presiones normales desde 0,5 hasta 8,0 kg/cm².

Con escalones de presión entre 0 - 0,5 kg/cm² la compresibilidad se presenta grande; $A_v = 0,09$ cm²/kg, $E_s = 24$ kg/cm², $M_v = 0,0043$ cm²/kg, y con los escalones máximos de 4,0 - 8,0 kg/cm², la compresibilidad disminuyó hasta los valores $A_v = 0,01$ cm²/kg, $E_s = 170$ kg/cm² y $M_v = 0,006$ cm²/kg. Los valores enunciados corresponden a los promedios para esas escalas de presión.

En la tabla siguiente se dan los promedios de estos índices para cada escalón de carga:

El coeficiente de permeabilidad k_v oscila entre 2×10^{-8} hasta 2×10^{-6} cm/seg para presiones de 0,5 kg/cm² y 8,0 kg/cm² como límite, respectivamente.

ESCALON DE CARGA, Kg/cm ²		Presiones, kg/cm ²		
DESDE	HASTA	k_v cm ² /kg	k_v cm ² /kg	
0,0	0,5	0,09	0,043	
0,5	1,0	0,05	0,024	38
1,0	2,0	0,03	0,012	67
2,0	4,0	0,02	0,009	114
4,0	8,0	0,01	0,006	170

Se dan las dependencias promedio entre el coeficiente de consolidación, C_v , y las presiones σ' del ensayo edométrico; fig.3.1.8.2. El mismo oscila en estas colas entre $2,5 \times 10^{-2}$ y $3,0 \times 10^{-3}$ cm²/seg. En la curva se dan los promedios para cada escalón de carga.

La figura 3.1.8.3 ilustra la variación del coeficiente de permeabilidad K , con las presiones ejercidas en las colas para los mismos escalones de carga de 0,5 hasta 8,0 kg/cm². Este oscila entre 1×10^{-6} hasta 2×10^{-8} cm/seg para presiones de 0,5 kg/cm² y 8,0 kg/cm² como límite, respectivamente.

En la figura 3.1.8.4 se dan la dependencia promedio entre el módulo de deformación edométrico, E_s , y la presión vertical, σ' . Los valores observados del módulo E_s , en estas colas, resultan mayores con relación a las de Nicaro, ya que en las de Moa no se manifiesta el efecto de la consolidación inicial, mientras que en las de Nicaro debido a los altos valores de e y condición semi-saturada, este efecto se hace notorio.

3.1.9 RESISTENCIA AL CORTANTE

Fueron ensayados monolitos así como muestras remoldeadas, reprodu

ciendo sus condiciones de campo en humedad y densidad mediante compactación estática, siguiendo el esquema de corte rápido con humedad natural.

El valor de la resistencia al corte arrojado por ellos independientemente, es diferente, comparable solamente el valor de la fricción interna que es muy parecido en ambos casos (33 en monolitos y 34,6 en muestras remoldeadas). El valor de la cohesión marca una gran diferencia entre un tipo y otro (de 0,62 kg/cm² en las muestras remoldeadas a 0,036 kg/cm² en los monolitos). La causa de estas diferencias y similitudes encontradas se explica mas adelante.

Corte rápido en monolitos con humedad natural.-

Para un total de 21 cortes realizadas de los cuales se despreciaron 6 normales, a presiones de 1, 2 y 4 kg/cm², se obtuvieron las dependencias que aparecen en la fig. 3.1.9.1, ploteadas analíticamente, así como la curva con los parámetros de resistencia promedio.

En la realización de los ensayos de corte rápido, se prepararon anillos de ensayos y cortados inmediatamente. La resistencia al cortante para cargas normales de 1,0 kg/cm² tomó valores de entre 0,72 - 0,83 kg/cm², con cargas de 2,0 kg/cm², entre 1,03 y 1,45 kg/cm², y con cargas normales de 4,0 kg/cm², entre 2,63 y 2,94 kg/cm². El tiempo de corte utilizado para cada una de las presiones correspondientes se mantuvo entre 2 y 5 min. generalmente; es decir, el corte fue lo suficientemente rápido como para no permitir pérdida ninguna de la humedad con la cual se ensayó, la que se puede considerar como constante.

Los parámetros de resistencia determinados por esta vía, c y ϕ , - se encuentran entre 0,02 - 0,13 kg/cm² para la cohesión, y 32°-36,8° para el ángulo de fricción interna. El promedio para las mismas - determinado por vía analítica es de 0,036 kg/cm² para la cohesión y 34,6 para el ángulo de fricción interna. Las envolventes de cada uno de los ensayos τ vs σ , así como la promedio se aprecian - en la fig. 3.1.9.1.

De los gráficos de dependencia entre la tensión y el desplazamiento por cortante, se nota claramente el corte mediante falla de tipo frágil en un 50% aproximadamente de los anillos cortados, y en los otros casos la falla se experimentó por deformación progresiva del material; lo cual no debe ser su comportamiento mas representativo atendiendo a su granulometría, pero que es posible que se manifieste y no en pocas muestras ya que como se dijo anteriormente, estas colas se encuentran completamente saturadas y bajo un contenido de humedad muy alto, mayor que 30%, siendo estos factores particularmente influyentes en este comportamiento al corta. Los valores medios normativos y de cálculo para diferentes probabilidades para este esquema de ensayo, se dan a continuación en la siguiente tabla:

TIPO DE ENSAYO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
RAPIDO	ϕ	21	34,6	34,5	34,5	34,5	34,4	0,005	-	-
CON HUMEDAD	$tg\phi$	21	0,69	0,69	0,69	0,69	0,68	0,005	0,004	0,002
NATURAL	c	21	0,036	0,035	0,03	0,03	0,03	0,005	0,003	0,002

La numeración de las columnas es idéa a las del cortante para las colas de Nicaro.

De los coeficientes de variación se deduce la exactitud en la determinación de los valores normativos para estas colas.

Corte rápido en colas remoldeadas.-

Se realizaron con humedad natural preparando previamente un "taco" tratando de reproducir sus condiciones de campo. En todos los casos analizados pudo alcanzarse el γ_d de campo (e incluso sobrepasado), pero resultó muy difícil lograr la humedad natural en que se encuentra la muestra y sólo llegaron a ensayarse a cortante, aquellos en los cuales pudo lograrse igual valor de su densidad seca de campo y valores de humedad muy cercanos. Lógicamente los valores arrojados de la resistencia al corte, partiendo de estas muestras resultaron mayores que las muestras de los monolitos. Es de señalar el hecho de que, en la preparación de las muestras de estas colas por medio de la compactación estática, resulta imposible poder separar completamente los grumos que se forman en el material al secarse éste, o sea, se forma una gran masa compacta, la cual para disgregar en sus componentes elementales es necesario el empleo de un martillo, y aún así no se llega nunca a disgregar completamente. Como esto sucede así, resultará muy difícil después que estas colas se hayan secado alcanzar su condición de humedad y densidad de campo mediante la compactación estática.

Debido a esto, los resultados de la resistencia al corte para estas muestras son mayores en cuanto a cohesión, cuyo valor constituye un buen índice para deducir el comportamiento de terraplenes y taludes con estas colas en condiciones de desecación constante, lo cual influye positivamente en su resistencia al corte, toda vez que se levanten con estas colas diques mayores en altura.

Los valores de la cohesión oscilaron entre 0 y 0,72 kg/cm², con un

valor promedio de $0,62 \text{ kg/cm}^2$ y de $41,6^\circ - 31^\circ$ para el ángulo de fricción interna, con un valor promedio de 33° . La dispersión que se experimenta en los valores es pequeña, reflejado por el valor del coeficiente de variación para cada caso. En la figura 3.1.9.2 se dan las envolventes para este esquema de ensayo.

Los tiempos de corte fueron menores que los alcanzados por las muestras de monolitos, con la misma velocidad en el equipo. Los valores de la resistencia al cortante con carga normal de 1 kg/cm^2 se mantuvieron entre $1,20$ y $1,47 \text{ kg/cm}^2$, con cargas de 2 kg/cm^2 entre $1,82$ y $1,96 \text{ kg/cm}^2$, y con cargas de 4 kg/cm^2 entre $3,07$ y $3,45 \text{ kg/cm}^2$. Estas en general varían muy poco. Ver tabla resumen.

A continuación, la tabla de los parámetros de resistencia para este esquema de ensayo.

TIPO DE ENSAYO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
RAPIDO CON HUMEDAD NATURAL (REMOLDEADO)	ϕ	12	33,0	31,5	31,1	30,5	29,2	0,132	-	-
	$tg \phi$	12	0,66	0,61	0,60	0,59	0,56	0,132	0,03	0,05
	c	12	0,62	0,53	0,50	0,46	0,37	0,132	0,09	0,14

La numeración de las columnas es idem a las anteriores del cortante.

4.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LAS PRESAS DE COLAS.

El diseño, construcción y operación de las presas de colas en el mundo, ha tomado una nueva dimensión en años recientes, debido al auge que van tomando las nuevas inversiones minero-metalúrgicas, así como también las ya existentes; actualmente en numerosos países entre ellos la URSS, Polonia, Bulgaria, Canadá y otros, se han dictado medidas y regulaciones concernientes al diseño, construcción y operación de las presas de cola. Estas medidas inciden fundamentalmente hacia dos aspectos: Los concernientes a la seguridad de la presa y los concernientes a la prevención de la contaminación del medio ambiente.

Con relación a lo anterior E. J. KLOHN 5, plantea lo siguiente:

" Un buen diseño de las presas de cola debe satisfacer los requerimientos básicos de seguridad, de control de la contaminación del medio, de la capacidad de almacenamiento de colas y ser económico. Para lograr ésto, el diseño tiene que estar basado en un amplio conocimiento tanto de los problemas geotécnicos en relación con la presa, así como los requerimientos que implica el desarrollo minero-metalúrgico. Obviamente, esto requiere una estrecha colaboración entre el ingeniero geotécnico diseñador y los operadores mineros. "

7
El diseño de las presas de colas difiere del diseño convencional de las presas de agua en tres importantes aspectos.

- 1.- La cantidad de material embalsado dentro de la presa constituyen colas, blandas y relativamente impermeables. La consistencia de las mismas puede variar en el rango del estado sólido al semi-líquido, dependiendo del contenido de partículas finas, su edad y de la localización del NF. Sin embargo, bajo los efectos dinámicos fuertes, todas las colas tienden a la licuación, convirtiéndose en un fluido de alta densidad.
- 2.- La mayor parte de una presa de cola es generalmente construida utilizando la fracción mas gruesa de la misma (fracción areno -

sa).

3.- La mayoría de las construcciones de presas de cola, se efectúa por el personal técnico de las fábricas metalúrgicas como parte de un proceso de construcción de la misma por etapas, según se requiera, para mantenerla por encima del nivel del agua en el embalse.

El primer factor influye en las fuerzas que pueden actuar sobre la presa, especialmente bajo cargas sísmicas. Los otros influyen decisivamente en el esquema de diseño de la sección finalmente seleccionada para la presa.

4.1.1 COMPARACION ENTRE LOS ESQUEMAS DE DISEÑO EN EL EXTRANJERO Y EN CUBA.

El cálculo de la estabilidad de las presas de cola en el extranjero se efectúa generalmente atendiendo a un estado en operación o explotación, toda vez que se complete la red de filtración a través del cuerpo de la presa. Es decir, la experiencia internacional en este sentido considera que en todos los casos en las presas de colas, se crea en el interior del embalse una laguna interna, dada la cantidad de agua con que se descargan las colas, que generalmente supera las 2/3 partes. Los componentes sólidos de las colas sedimentan quedando una laguna de deposición dentro de la presa; el agua aquí retenida no tiene posibilidad de salida al exterior como no sea a través del cuerpo del dique.

De aquí que el problema de la estabilidad de las presas de cola en el extranjero se complique al respetar las regulaciones gubernamentales que prohíben la contaminación del medio por escape de estas aguas al exterior, ya que generalmente contienen ácidos, sales u otras sustancias nocivas a la flora o los organismos vivientes, in-

cluyendo el hombre.

En el caso cubano, este estudio se realiza por primera vez, resultando particularmente virgen, careciendo por tanto de la experiencia necesaria para establecer los criterios adecuados en cuanto a diseños, construcción y operación. Por otro lado, aunque existen leyes que prohíben la expulsión de los residuos al medio exterior con peligro de contaminación, no se han tenido en cuenta hasta hoy, principalmente en las fábricas metalúrgicas de Moa y Nicaro que -- constituyen las dos fábricas fundamentales de explotación de Ni y Co en nuestro país. Las mismas expulsan las colas hacia las presas correspondientes mediante tubos, los cuales se van cambiando de posición al cabo de cierto tiempo pero sin responder a ningún criterio tecnológico o ingenieril. Estas colas que salen en estado de pulpa caliente, avanzan a todo lo largo del dique descargando el componente líquido hacia fuera del embalse en los dos casos analizados (Moa y Nicaro). En el caso de Nicaro, estos residuos líquidos que constituyen en volumen la mayor parte (las 2/3 partes aproximadamente), descargan directamente hacia el mar, en la bahía de Arroyo Blanco contaminando la misma.

En el caso de Moa, la parte líquida de las colas se descarga idénticamente hacia fuera del embalse, contaminando un gran área exterior por donde atraviesa el río Moa, muy cercano a su desembocadura. El P_H de estas aguas es menor de 6.

La afectación del medio provocada por estas colas, como resultado del proceso metalúrgico anterior, resulta un tema de particular interés a investigar, por su incidencia directa en el plano social.

De lo anterior resulta obvio que en el interior de estas presas de cola no se formen lagunas interiores y por tanto, cabe cuestionar -

si el esquema que mas se acerca a la realidad para el estudio de la estabilidad de las mismas sea el de operación u otro. En este sentido, en el caso cubano está por investigar cual será el esquema de análisis que mas se acerque a la realidad teniendo en cuenta como variarán los niveles freáticos dependiendo de la tecnología de deposición que se emplea en ambas presas y poder afirmar que el caso mas desfavorable es el de operación, u otro. No obstante, para todos los casos que hemos analizado, se ha considerado el cálculo de la estabilidad de la presa, situando el problema como un análisis en operación o explotación.

4.2 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE LAS COLAS DE LA FABRICA "COMANDANTE RENE RAMOS LATOUR" (NICARAO)

Para el análisis de la estabilidad de estas colas se tomaron una serie de variantes en cuanto a potencias de las mismas, combinando combinando éstas con diferentes profundidades posibles del nivel freático, variando éste desde 1,0 a 4,0 m, alternando estas profundidades del NF con distancias variables de los puntos de desarrollo de la línea de corriente superior que mediaban desde 20,0 m hasta 60,0 m del pico de la cola que exhibe el dique en su corona. (Ver figuras 4).

Con estas condicionales se plantearon dos casos fundamentales, A-1 y A-2, fijando una potencia de colas en el embalse de 12,40 m. Como características geométricas generales el caso A-1, este considera el NF a 1 m de profundidad, a 20 m. de distancia del dique (fig. 4.2.1), considerando un dique inicial de suelo compactado (que en la figura da el aspecto de una banquetta) de 4,80 m de altura y 3,20 m de ancho en su corona, con una inclinación de sus taludes de 1 : 1 a ambos lados, desplantado sobre la arcilla compacta, que se encuentra bajo el mar. El dique inicial está sumergido por el

mar hasta una altura de 4,00 m. A partir de este, siguiendo una dirección aguas arriba, se extienden los diques de cola (línea 3) -- que son encargados de retener la cola que se deposita en el embalse. Estos tienen una inclinación de aproximadamente 50° (1 : 0,83) y constituyen el objeto de nuestro cálculo de estabilidad.

Para el cálculo de la estabilidad del dique se utilizaron los métodos de BISHOP, 1953 y FELLENIUS, 1918, que suponen falla circular empleando para ello un programa de computadoras desarrollado por E. HORTA, 1975.

El caso A-2 responde a las mismas condicionales en cuanto a diseño que el caso A-1, pero se diferencia en que la profundidad de NF -- que se estima aquí es de 4,0 m, a 60 m de distancia del dique, fig. 4.2.2. Como se ve de ambas figuras, su única diferencia la constituye la situación de la línea de corriente superior.

La sección correspondiente a estos casos se dividió en 5 tipos principales de suelos.

Entiéndase colas en los casos que no sean propiamente suelos. En general para todos los casos, los así llamados suelos I, II y III son propiamente colas:

Suelo I.- Está representado por las colas que se encuentran por encima de la línea superior de flujo y la condición que presentan es de cola con humedad natural.

Suelo II.- Corresponde a las colas que se encuentran por debajo de la línea superior de flujo y se extiende en profundidad hasta el límite señalado por el nivel del mar, que se encuentra en el interior de todo embalse de colas. El estado de las mismas es saturado.

Suelo III.- Está limitado en su parte superior por el nivel medio del mar y por debajo con el estrato de arcilla marina compacta que le sirve de cimentación a la presa.

Suelo IV.- Lo constituye el terraplén del dique inicial y consiste de una arcilla carmelita plástica, compactada. Este inicia la construcción de la presa y es el encargado de garantizar su estabilidad, si el esquema de diseño de la presa sigue la dirección aguas arriba, que es, en el caso de Nicaro el utilizado.

Suelo V.- Suelo de cimentación, está constituido por arcilla de consistencia dura, impermeable, con intercalaciones de arena y -- otros cantos producto de materiales trasladados por las corrientes de la bahía hacia la costa. La potencia de la misma es mayor de 2,00 m en toda el área del yacimiento.

Fijadas las secciones correspondientes a este caso A-2, se calcularon una serie de variantes, donde se recogieron diferentes propiedades de las colas, en base a los ensayos de resistencia a cortante que fueron utilizados, sorteando los mismos para diferentes esquemas de ensayos en busca de situaciones favorables para la estabilidad general del dique. El comentario relacionado con el análisis de la estabilidad en cada variante analizada, se da a continuación de las mismas en dependencia de los valores arrojados del factor de seguridad.

La variante 1 del caso A-2 representa la sección siguiente

Suelo I: $\gamma_s = 1,94 \text{ T/m}^3$, $c = 1,6 \text{ T/m}^2$, $\phi = 25^\circ$

Valores correspondientes a los promedios normativos de estos índices. Los parámetros de resistencia c y ϕ son del esquema de cortante rápido saturado remoldeado.

Suelo II: $\gamma_{sat} = 2,15 \text{ T/m}^3$, $\gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 1,6 \text{ T/m}^2$, $\phi = 25^\circ$
Se corresponden con los datos normativos del esquema de cortante rápido ídem que para Suelo I.

Suelo III: $\gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 1,6 \text{ T/m}^2$, $\phi = 25^\circ$

Del esquema de corte rápido ídem suelo I y II.

Suelo IV y V: $\gamma' = 1,0 \text{ T/m}^3$, $c = 1,0 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$

Estos se encuentran sumergidos completamente. Los datos de estos suelos son asumidos, por carecer de información, aunque pudieran ser algo mayores.

Con todas estas propiedades de los diferentes tipos de suelos, es-
quematizada la sección según fig. 4.2.2 y ajustando la misma a - -
nuestro sistema de coordenadas, se corrió el programa, dando los -
factores de seguridad que se ilustran en el gráfico. Como se ve pa-
ra esta primera variante representada del caso, resultó inestable
con círculos de falla que atraviesan el dique inicial para ambos -
métodos de cálculo.

Esta situación desfavorable pudiera deberse a la condición de que
el suelo II se encuentra sumergido a los efectos de la resistencia
a cortante. Si considerásemos la condición de que el mismo esté sa-
turado con agua de capilaridad, esta condición mejoraría en algo -
la estabilidad, ya que pasamos de la condición sumergida a la con-
dición saturada. De esta forma partimos hacia una segunda variante
del caso A-2, donde las propiedades de los suelos presentes en el
perfil de la sección, fig. 4.2.2, cambiarían de la siguiente mane-
ra:

Suelo I : $\gamma_s = 1,94 \text{ T/m}^3$, $c = 1,6 \text{ T/m}^2$, $\phi = 25^\circ$, de los da-
tos del ensayo de corte rápido saturado en monolitos.
Suelo II: $\gamma_{sat} = 2,15 \text{ T/m}^3 = \gamma'$, $c = 0$, $\phi = 28^\circ$, partiendo de
la consideración arriba expuesta en cuanto a las densidades, y
considerar los valores de c y ϕ correspondientes a los datos ---
arrojados por los ensayos de corte lento saturado remoldeados,
para un 95% de probabilidad.
Suelo III : $\gamma_{sat} = \gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 28^\circ$
Aquí todo el material se encuentra por debajo del nivel del mar
por tanto $\gamma_{sat} = \gamma'$ y c y ϕ corresponden a los valores normati-
vos del ensayo de corte lento saturado.
Suelo IV y Suelo V : $\gamma' = 1,0 \text{ T/m}^3$, $c = 1,0 \text{ T/m}^2$ y $\phi = 20^\circ$
Idem variante 1.

Con estas condicionales, el talud resultó nuevamente inestable, con
factores de seguridad 0,88 y 0,90 como los mas desfavorables por
los métodos de Fellenius y Bishops respectivamente. La situación -
de estos centros críticos se da en la fig. 4.2.3

Analizamos una tercera variante, que consistió fundamentalmente en
mejorar las propiedades de los suelos ya que las posibilidades de

ensayos lo permitieron, y las situamos para cada tipo de suelo de la siguiente manera:

Suelo I.- $\gamma_f = 1,94 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 28^\circ$
 De los datos del ensayo lento (valores normativos)
 Suelo II.- $\gamma_{sat} = \gamma' = 2,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 28^\circ$, idem que variante 2
 Suelo III.- $\gamma_{sat} = \gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 28^\circ$, idem que variante 2.
 Suelo IV y V.- $\gamma' = 1,0 \text{ T/m}^3$, $c = 1 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$, idem que las variantes 1 y 2.

Con este juego de valores la situación se presentó inestable para un centro por el método de Fellenius, el cual arrojó un $F_s = 0,99$ de coordenadas $x = 32 \text{ m}$, $y = 2 \text{ m}$, y profundidad del círculo - - 14,0 m según el amarre efectuado del sistema de coordenadas, figura 4.2.4.

Para la variante 4, las propiedades de los suelos fueron las siguientes:

Suelo I.- $\gamma_f = 1,94 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 31,7^\circ$
 (Valor normativo de γ_f y de diseño de c y ϕ del cortante rápido en monolitos para una probabilidad de 85%)
 Suelo II.- $\gamma_{sat} = \gamma' = 2,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 31,7^\circ$
 (Igual que para variante 3, pero valores de ϕ para probabilidad del 85%)
 Suelo III.- $\gamma_{sat} = \gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 28^\circ$
 (Idem variante 2 y 3)
 Suelo IV y V.- $\gamma' = 1,0 \text{ T/m}^3$, $c = 1,0 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$

Con estas condiciones se presentó inestable para el mismo centro que la variante 3, por el método de Fellenius ($F_s = 1,0$). Las -- coordenadas de dicho centro son $x = 32 \text{ m}$, $y = 2 \text{ m}$, con una profundidad del círculo de 14,00 m de acuerdo con el sistema de -- coordenadas adoptado (fig. 4.2.5). Esta superficie desfavorable atraviesa todo el dique inicial en su parte inferior.

La variante 5 analizada, fig. 4.2.6, está representada por las siguientes condicionales:

Suelo I.- $\gamma_f = 1,94 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 31,7^\circ$
 (Idem variante 4)

Suelo II.- $\gamma_{sat} = \gamma' = 2,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 31,7^\circ$
 (Idem variante 4)
 Suelo III.- $\gamma_{sat} = \gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 31,7^\circ$
 Idem variante 4 para γ_{sat} , γ' y c , pero ϕ , normativo de mo-
 nolitos para 95% de probabilidad.
 Suelo IV y V.- $\gamma' = 1,0 \text{ T/m}^3$, $c = 2,0 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$

Aquí se aumenta el valor de la cohesión tanto del suelo de cimen-
 tación así como del dique inicial. El suelo de cimentación se --
 presentó como una arcilla compacta incluso antes del inicio de
 la construcción de la presa. En la actualidad presenta una sobre-
 carga considerable de colas que han influido en ella una gran con-
 solidación a lo largo de 20 años. Nótese que la sobrecarga mas --
 pequeña de colas que obran sobre este suelo de cimentación repre-
 sentado por los casos A-1 y A-2, es de 12,40 m de colas con pe--
 sos volumétricos altos. La presión debida a peso propio de las co-
 las sobre ella es superior a 18 T/m^2 .

Por otra parte, el suelo del dique inicial presenta una buena com-
 pactación, se trata de una arcilla compactada de consistencia du-
 ra, y el valor de la cohesión adoptado no resulta exagerado para
 la misma.

El análisis de esta variante demostró que la resistencia al es-
 fuerzo cortante que se genera en la masa de colas, mejora modes-
 tamente, llegando a valores de $F_3 = 1,015$ para el centro mas crí-
 tico (el mismo centro que la variante 4), siendo éste el mas pe-
 queño por Fellenius y de 1,19 por Bishop. Fuera de este establecimiento
 alrededor de este punto resultan estables los valores de F_3 de este

No obstante resultar favorable esta última variante, implica que
 el equilibrio en que se encuentra para esas condiciones puede al-
 terarse por un cambio cualquiera en las propiedades físico-mecá-
 nicas de las colas, producto de ascensos bruscos del NF, debido
 a las precipitaciones (puede cambiar la condición del suelo I ,

de γ_j a γ_{sat}), acciones dinámicas repentinas debido a sismos u otras causas.

Con estas 5 variantes, se han analizado situaciones extremas correspondientes a este caso A-2, sorteando con las diferentes propiedades que se dieron en cada variante y para todas, iguales alturas de colas, 12,40 m , iguales secciones del dique inicial en altura y en ancho de su corona.

En la realidad, éste es un poco más ancho que el que estamos considerando, y según los planos analizados para la construcción de dicho dique inicial en el año 1958, da para éste una altura variable de entre 1,4 - 5,9 m , dependiendo de la profundidad a que se encuentra el mar, y un ancho variable pudiendo llegar allos 7 m y más.

Considerando ésto, se preparó una sexta variante (fig. 4.2.7), la cual contempla los mismos tipos de suelos que la variante 5, con las mismas propiedades, pero con ancho en la parte superior del dique mayor, ésto es: altura de la cola = 12,40 m , altura del dique inicial = 4,80 m , ancho de la parte superior del dique = 6,00 m . Las propiedades de los distintos tipos de suelo son iguales a las de la variante 5. El análisis de la estabilidad para el mismo demostró que solamente la inestabilidad se presenta localmente, por rompimiento del talud en sus partes mas altas, no presentando superficies críticas que pasen por el pié del dique inicial o por el suelo de cimentación, (fig.4.2.7). Estas fallas pudieran ser evitadas tendiendo algo mas el talud, lo cual sería ventajoso, pero queda por analizar la misma situación con potencia de colas mayor que 12,40 m . Esto se comenta en los casos B.

Se comprobó a partir de todas las variantes para el caso A, de

acuerdo a lo explicado anteriormente, la inestabilidad general del talud actual, pudiendo afirmar que el mismo no es seguro, - incluso con la última variante que resulta de todas la mas favorable.

CASOS B (NICARO)

Representan genéricamente los casos en que la altura de colas en la presa es de 15 m . En el presente trabajo se dan tres casos con esta misma potencia:

CASO B-1 , considera NF a 1 m de profundidad, con línea de corriente superior que comienza a desarrollarse a 20 m de distancia de la cresta del dique (fig. 4.2.8).

CASO B-2, considera NF a 4 m de profundidad, con línea de corriente superior desarrollándose a 60 m de distancia de la cresta del dique (fig. 4.2.9).

CASO B-3, considera NF a 1 m de profundidad, con línea de corriente superior desarrollándose a 60 m de distancia de la cresta del dique (fig. 4.2.10).

Siguiendo el mismo esquema que para los casos A, se dividieron las colas en diferentes tipos de suelos, éste es I, II, III, etc. se consideró dique inicial compactado de 5 m de altura y taludes 1:1 sumergido en el mar, con un ancho en su parte superior de 5 m. La inclinación de las colas sobre el dique inicial sigue siendo la misma que el caso A, aproximadamente 50°.

CASO B-1 : NF 1 m a 20 m del dique.

Las propiedades de los 5 tipos de suelos en que se dividió el caso, se corresponden idénticamente con las de la variante 1 - del caso A-2 analizado anteriormente, diferenciándose de éste en que la línea de corriente superior se encuentra mas arriba,

sección del dique inicial diferente y altura de cola de 15 m ,
(fig. 4.2.8).

Con estos datos el talud resultó completamente desfavorable --
por ambos métodos de estabilidad (Bishop y Fellenius).

CASO B-2 : NF 4,00 m a 60,00 m del dique.

Se diferencia del caso B-1 en la posición de la línea de co -
rriente superior, que es mas baja para este caso (fig. 4.2.9).

La sección, así como las propiedades de los suelos, sigue sien -
do la misma.

Se analizaron dos variantes, la variante 1 considerada es como
se ilustra en la figura anterior. Esta resultó inestable por -
el método de Fellenius, con un círculo de falla localizado en
 $X = 28 \text{ m}$, $Y = 2 \text{ m}$, con una profundidad del mismo de 14 m , -
atravesando el dique inicial, con un factor de seguridad de --
0,96.

La variante 2 para el caso se plantea de la siguiente forma:

Suelo I: $\gamma_s = 1,94 \text{ T/m}^3$, $c = 0 \text{ T/m}^2$, $\phi = 31,7^\circ$

Valor normativo de γ_s , tomando ϕ del esquema de corte rápi -
do saturado en monolitos y c del mismo esquema pero en mues -
tras remoldeadas, ambos valores para una probabilidad del -
85 %.

Suelo II: $\gamma_{sat} = 2,15 \text{ T/m}^3$, $\gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 31,7^\circ$
 c y de corte rápido en monolitos para 85% de probabilidad.

Suelo III: $\gamma_{sat} = \gamma' = 1,15 \text{ T/m}^3$, $c = 0$, $\phi = 31,7^\circ$
 c y , idem suelo II

Suelo IV y V: $\gamma' = 1 \text{ T/m}^3$, $c = 2,0 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$
Idem a variante 5 del caso A-2.

Bajo estas condiciones la estabilidad de la presa está condi -
cionada solamente a fallas locales en el cuerpo del talud, con
 F_s entre 0,8 y 0,9, tal como se apreciaba en la figura 4.2.11.

No obstante, las fallas que surgen bajo este esquema que sólo

se presentan locales, como ya presenta una potencia de 15 m de
colas, hay que manejar el análisis con mucho cuidado. Estas fa

llas locales nos indican los inconvenientes que traerían potencias superiores de cola, al disminuir la resistencia del talud aguas abajo.

En la práctica, la presa presenta ya, potencias mayores que 15 m en algunos puntos y en éstos, así como en otros de menor potencia (como el caso A-2, variante 6) se notan claramente las fallas locales que arrojan los casos analizados, corroborando de esta forma la vigencia de nuestros análisis de la estabilidad.

El caso B-3 no fue analizado porque queda enmarcado entre los casos B-1 y B-2 y resulta imprecendente. Además teniendo en cuenta que para el caso B-2, la situación se presenta inestable que es el que posee la línea de flujo mas baja; no necesitan mayores comentarios los casos B-1 y B-3.

Para el análisis de la estabilidad del dique de Nicaro, consideramos que la falla que se produce es de tipo circular, no obstante esta hipótesis puede no ser la correcta al estar condicionada la estabilidad a fallas locales del cuerpo del talud por rupturas o desmoronamiento del material arenoso que forma el dique. En este caso se deberían investigar superficies no circulares de deslizamiento, que por otra parte resultarían mas complejas; pero este caso no es frecuente en nuestra presa.

4.3 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE LAS COLAS DE LA FABRICA "COMANDANTE PEDRO SOTO ALBA" (MOA).

Las colas de la fábrica "Comandante Pedro Soto Alba", se depositan en el área "La Veguita", cercana a la misma, hace relativamente poco tiempo y las colas allí depositadas no alcanzan aún un espesor tal, que haga necesario la continuación del dique hacia arriba, por lo menos para los próximos años.

El dique inicial está constituido de suelo laterítico compactado, de 3,0 m de ancho en su corona, con taludes iguales de 1:1, aguas arriba y abajo, con una altura variable entre 4,0 - 5,0 m. . El mismo se encuentra desplantado en su parte NE sobre un terreno cenagoso de características geotécnicas desfavorables en sentido general, y en su parte SW sobre un terreno constituido de suelo laterítico mucho mejor que el anterior, pero con poca capacidad soportante.

Como el nivel de colas es muy pequeño (1 - 2 m), se analizó un caso futuro de altura de colas de 10,0 m, siguiendo el diseño aguas arriba, con un ángulo del talud aguas abajo cercano a los 50° , considerando el NF a 1,0 m de profundidad a 20 m de la -- cresta del dique. A este caso le llamaremos caso M, variante 1, figura 4.3.1.

Está compuesto de 4 tipos principales de suelos, donde I y II son propiamente colas, y III y IV, el suelo del dique inicial y el de cimentación respectivamente.

Las propiedades que se tomaron en consideración para cada tipo de suelo son:

Suelo I: $\gamma_f = 2,29 \text{ T/m}^3$, $c = 1,8 \text{ T/m}^2$, $\phi = 31^\circ$
Corresponden a γ_f normativa (igual a la del 99% de probabilidad), y valor de la cohesión intermedio de los ensayos de -- corte rápido en muestras remoldeadas, así como el ϕ , correspondiente al valor mínimo encontrado por el mismo esquema de ensayo.

Suelo II: Presenta iguales propiedades que el suelo I. Estas colas se caracterizan por presentar completa saturación a -- partir de la superficie. Aquí consideramos $\gamma_{sat} = \gamma'$. Esto aumenta la estabilidad a los efectos del agua de capilaridad.

Suelo III: $\gamma_f = 2 \text{ T/m}^3$, $c = 1,6 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$
El valor de la densidad corresponde al máximo que fue determinado directamente "in situ", siendo su valor normativo -- igual a $1,75 \text{ T/m}^3$; es decir, estamos considerando el valor -- de la densidad por exceso. Los valores de c y ϕ están minorados.

Suelo IV: $\gamma' = 1 \text{ T/m}^3$, $c = 1 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$
Estos valores son sobrestimados por encima de los reales. Co

mo se aclaró anteriormente, la cimentación se presenta buena en la parte SW, no así en la parte NE donde es cenagosa. Por ello los datos son buenos para una parte, para la otra no.

Con estas condiciones, se presentó favorable el talud, pero -- con F_s algo pequeños para considerar un esquema seguro, con esa altura de colas, que fueron de 1,14.

Esto indica que si consideramos valores mas pobres que los usados para la zona de cimentación, con esta altura de colas el talud resultaría inseguro. Resulta por tanto obvio, lo que sucedería para alturas mayores de 10,0 m considerando incluso las propiedades normativas. Ya esta situación se vió en el diseño de la presa de cola realizado por la EPOH-2, donde fue necesario utilizar grandes banquetas, mayores de 20 m, en la zona del pantano.

Considerando ésto, fueron analizadas dos variantes adicionales. Los esquemas de ensayo utilizados para estas colas responden a los de ensayos de corte rápido.

Además de todo lo anterior, en la parte cenagosa hacia el NE, ya se observan claramente en la superficie del dique inicial, grietas transversales producto de asentamientos que se han producido en el dique inicial.

Anteriormente se pensó realizar el dique completo, con una altura considerable de lateritas del orden de los 15 m., por considerar la cola de Moa muy mala como material de construcción para la propia presa.

La variante 2 del caso M, fig. 4.3.2, considera el mismo esquema de diseño, con las siguientes propiedades de suelos, sin tener en cuenta que exista agua de capilaridad como en la variante 1, en el suelo II y eliminar con ésto las dudas.

Suelo I: $\gamma_s = 2,29 \text{ T/m}^3$, $c = 0,4 \text{ T/m}^2$, $\phi = 34^\circ$
 Estas propiedades corresponden a los promedios normativos de c y ϕ , del cortante directo en monolitos.

Suelo II: $\gamma_{sat} = 2,29 \text{ T/m}^3$, $\gamma' = 1,29 \text{ T/m}^3$, $c = 0,4 \text{ T/m}^2$
 $\phi = 34^\circ$

Estamos considerando el efecto del agua por debajo de la línea de corriente superior, donde existe completa saturación. Esto disminuye la estabilidad, contrario a la variante 1.

Suelo III: $\gamma' = 0,75 \text{ T/m}^3$, $c = 0,5 \text{ T/m}^2$, $\phi = 27^\circ$
 Donde c y ϕ , son del ensayo triaxial lento en monolitos del terraplén.

Suelo IV: $\gamma' = 0,75 \text{ T/m}^3$, $c = 0,5 \text{ T/m}^2$, $\phi = 18^\circ$
 Aquí estamos considerando la parte de la cimentación que resulta desfavorable, y en este caso el valor de ϕ , es asumido, pudiendo ser menor.

Con estas condicionales el caso es desfavorable completamente, siendo la condición crítica, falla de base atravesando el suelo de cimentación IV, localizado su centro en $X = 32 \text{ m}$, $Y = 2 \text{ m}$, con una profundidad de la superficie de falla de 16 m; según Fellenius dando falla de base y de 12 m, según Bishop dando falla por el pie del dique inicial; fig. 4.3.2.

La variante 3, tiene en cuenta la parte de la cimentación considerada como buena hacia SW.

Está constituida por:

Suelo I: $\gamma_s = 2,29 \text{ T/m}^3$, $c = 0,4 \text{ T/m}^2$, $\phi = 34^\circ$

Idem variante 2.

Suelo II: $\gamma_{sat} = 2,29 \text{ T/m}^3$, $\gamma' = 1,29 \text{ T/m}^3$, $c = 0,4$, $\phi = 34^\circ$

Idem variante 2.

Suelo III: $\gamma' = 0,75 \text{ T/m}^3$, $c = 3,0 \text{ T/m}^2$, $\phi = 26^\circ$

c y ϕ , normativo del ensayo triaxial rápido en monolitos

Suelo IV: $\gamma' = 1,0 \text{ T/m}^3$, $c = 1 \text{ T/m}^2$, $\phi = 20^\circ$

Estos son asumidos para el suelo de cimentación en la parte conceptuada como favorable.

El análisis de estabilidad de esta variante, demuestra que pese al aumento de las propiedades del suelo de cimentación, la situación se mantiene inestable, con superficies críticas atravesando incluso el suelo IV en $X = 32 \text{ m}$, $Y = 2 \text{ m}$, con círculos profundos a 14 m, y también superficies locales en $X = 28 \text{ m}$, $Y = 2 \text{ m}$, con profundidad de las mismas de 6 m, tanto por - -

Bishop como por Wellenius. Fig. 4.3.3

Como se ve, de todas las variantes analizadas en el caso de Moa resulta crítica la estabilidad de la presa para la altura de colas que fue considerada, igual a 10 m, si se escoge un diseño - aguas arriba.

Por ello se impone una investigación detallada del terreno de cimentación, en su parte buena y mala, así como del terraplén que constituye el dique inicial, además precisar el esquema de diseño que se seguirá; para realizar la misma aún se está a -- tiempo dada la juventud de la presa y no tener que lamentar -- pérdidas considerables en un futuro no lejano.

En el caso de la presa de cola de Nicaro, puede crearse un estado crítico en la estabilidad de la misma, cuando producido de las precipitaciones que saturan todo el embalse y se produce una acción sísmica simultáneamente, hecho que no que de extenso, la intensidad sísmica de la zona es 6 en la escala M.E.3.

Los ensayos del cortante rápido en estas colas, para el análisis de la estabilidad efectuado, pueden sesgar las condiciones existentes, principalmente para la presa de cola de Nicaro, ya que en la misma no se crea una posición del HF alta, y la red de flujo encuentra su línea de corriente superior a un nivel muy bajo, ya que toda el agua de las colas drena por la superficie del embalse hacia el exterior. De permanecer el agua de las colas retenida en el interior del embalse formando una laguna interna, lo cual no es la situación actual corres -

CAPITULO V

CONCLUSIONES.

- Tanto las colas de Nicaro como las de Moa, constituyen materiales propensos a experimentar en determinadas condiciones, fallas por licuación. Están constituidos fundamentalmente por fracciones de arena muy fina (0,10 - 0,05 mm) y limos (0,05 - 0,002 mm) en porcentajes que exceden el 50% para las arenas muy finas y el 20% para las partículas limosas. Ambas presentan D_{10} menor que 0,1 mm, C_u menor que 5, y IP menor que 6;
- Para ambos tipos de colas, no se detectó la presencia de partículas arcillosas inferiores a 0,002 mm, para diferentes soluciones defloculantes y diferentes laboratorios.
- En el caso de la presa de cola de Nicaro, puede crearse un estado crítico en la estabilidad de la misma, cuando producto de las precipitaciones quede saturado todo el embalse y se produzca una acción sísmica simultáneamente, hecho que no queda exento. La intensidad sísmica de la zona es 6 en la escala M.K.S.
- Los ensayos del cortante rápido en estas colas, para el análisis de la estabilidad efectuado, pueden semejar las condiciones existentes, principalmente para la presa de cola de Nicaro, dado que en la misma no se crea una posición del NF alta, y la red de flujo encuentra su línea de corriente superior a un nivel muy bajo, ya que toda el agua de las colas drena por la superficie del embalse hacia el exterior. De permanecer el agua de las colas retenida en el interior del embalse formando una laguna interna, lo cual no es la situación actual corres -

pondería entonces el análisis de la estabilidad a un caso en operación o explotación y para éste resultarían prácticos los esquemas de corte utilizando el equipo triaxial, estudiando el talud aguas abajo. Siempre que la situación sea semejante a la actual, podrán utilizarse los datos de los ensayos rápidos de corte directo.

- Atendiendo los resultados del análisis de la estabilidad en la presa de Nicaro, no debe continuarse el incremento del dique en altura con las colas, a menos que se decida realizar investigaciones exhaustivas del dique inicial actual y de las condiciones de cimentación de la misma. A partir de nuestros análisis, se presenta inestable para todas las variantes analizadas.
- Las colas de Moa pueden ser utilizadas como material de construcción para el dique, siempre que se escoja el mejor esquema de diseño y no utilizar lateritas compactadas para continuar el dique de retención como se había propuesto anteriormente. Las características que presentan estas colas sitúan a las mismas como material bueno para la construcción. Este hecho disminuiría considerablemente el costo por concepto de la operación que requiere levantar un gran dique de lateritas por una parte, y por la otra los gastos de transportación que se llevaría la misma hasta el sitio de la presa.
- Los esquemas de análisis de estabilidad de las presas de colas usados en el presente trabajo y que responden a superficie circular de deslizamiento, constituyen una buena aproximación al caso real actual. Mediante los mismos se han podido establecer incluso, las fallas locales que ocurren actualmente en la parte superior del dique de la presa de colas de Nicaro.

- La contaminación del medio que ocasionan tanto las colas de -
Nicaro como las de Moa, especialmente esta última, donde dia-
riamente salen junto con las colas decenas de toneladas de -
 SO_4H_2 y cientos de kilogramos de SH_2 , sustancias altamente no
civas, es sumamente grande. De esta forma se contaminan con -
los residuos de la producción industrial, áreas bastante ale-
jadas de la zona de la presa, debido a la salida del componente
líquido de las colas al exterior de la presa. En este sen-
tido en el futuro, aunque los esquemas de diseño de las pre -
sas de cola se compliquen algo, se hace necesario retener el
agua de dichas colas en el interior de los embalses.

RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS.

- En el caso de la granulometría de las colas en estudio, debe ser investigado el contenido de partículas finas arcillosas, fundamentalmente para las colas de Moa, donde seguramente contienen algún porcentaje que puede influir positivamente en su cohesión. Al mismo tiempo debe ser investigada la posibilidad de que las soluciones químicas que presentan en su estado natural pudieran ofrecer algún tipo de reacción con diferentes tipos de soluciones defloculantes.
- Se recomienda investigar la composición mineralógica de las colas y conocer mediante ellas la influencia que tendrá en los procesos de formación de los enlaces estructurales. Si la composición mineral está representada por minerales activos desde el punto de vista físico y químico, el valor de la humedad puede ser muy alto y conservarse por mucho tiempo, a la vez que el proceso de consolidación se producirá muy lento, igual que en los suelos.
- Es necesario estudiar la influencia del tiempo en la formación de los enlaces. Si el proceso de formación de los enlaces se efectúa relativamente rápido en el tiempo en comparación con el proceso de acumulación de la carga de las colas, dicha carga no presentará mucha importancia y en este caso no será aplicable la teoría de consolidación de Terzaghi, y se hará necesario buscar otro mecanismo que explique la misma. En el caso de que el desarrollo de los enlaces se produzca lentamente en el tiempo, entonces la carga de las colas tendrá su influencia en la consolidación de las mismas, siendo válida la teoría de Terzaghi.

- La metodología de selección y muestreo de las colas deberá realizarse en base a tomas de muestras inalteradas, manual o mecánicamente, de forma tal que las muestras tomadas a diferentes profundidades y en diferentes puntos del embalse, no presenten mucha alteración. Deberá hacerse énfasis en la realización de trabajos experimentales directamente "in situ", para la obtención de algunas de sus propiedades, por ejemplo, pudieran usarse el penetrómetro estático, veleta, u otros. Del análisis de los datos de las propiedades físico-mecánicas investigadas, de seguir esta metodología deberán puntualizarse para toda la superficie del embalse, así como en profundidad hasta el terreno de cimentación.
- En condiciones de humedad constante resultarán útiles las correlaciones entre la resistencia al cortante de las colas y la densidad, el porcentaje de partículas arcillosas, índice de plasticidad, etcétera. Esto nos facilitará conocer la tendencia de su variación en relación con las propiedades físicas.
- El agua de capilaridad presenta su influencia en el caso de las colas de Nicaro, donde al parecer, las colas por debajo de la superficie del embalse, la fuente de resistencia entre las partículas la constituye el agua de capilaridad. Como esto es una condición sujeta a cambios, se recomienda investigar a fondo los efectos positivos y negativos que presenta la misma en la resistencia al cortante de estas colas.
- Se debe prestar especial cuidado en la investigación sobre los esquemas de diseño a usar para las presas de colas en Cuba para los próximos años, comenzando por la presa de Moa. No obstante, cualquier variante de diseño que se escoja finalmente

- en Moa, se deberá investigar los factores de seguridad de la presa en operación, que se van alcanzando en la medida que se levante el dique y la altura de colas para distintos estadios de crecimiento de la misma. En este sentido deberán relacionar se simultáneamente tres aspectos fundamentales: la altura máxima de colas en la presa, el ángulo de inclinación o pendiente del talud, independientemente de que el esquema de diseño se efectúe aguas abajo, aguas arriba o centralmente (5) y la variación de los factores de seguridad en dependencia de las condiciones de carga a que se vea sometida la presa.

- Recomendamos como muy necesaria una adecuada y sistemática atención a la operación y mantenimiento de las presas de colas objeto de nuestro estudio, con criterios geotécnicos que serán los encargados de decidir la seguridad tanto de la presa en sí como la del medio ambiente natural. Esta operación puede llevarse a cabo por el personal técnico que labora en las mismas fábricas; ya que exige un tiempo mínimo y sin embargo las ventajas que se logran son grandes, tanto económica, al cuidar un futuro yacimiento de minerales útiles como lo es en sí una presa de colas, como socialmente, al reducir al mínimo la posibilidad de la contaminación del medio ambiente natural.

R E F E R E N C I A S

- 1 - Academia de Ciencias de Cuba: "Atlas Nacional de Cuba", Habana, 1970.
- 2 - Armas N R: "El método de Hilf para presiones de poro. Su -- aplicación a dos suelos cubanos", Rev. Ing. Civil, Vol. 1, pag. 35 - 48, Cuba, 1977.
- 3 - De Vettler, R.D.: "Metalurgia extractiva de los minerales - oxidados de níquel", compendio de artículos, pag. 9 - 18, Cuba, 1972.
- 4 - Iliev, E.S., et al.: "Experience from the construction of dams for tailing dumps in the people's Republic of Bulgaria", Memories of XII Intern. Congress of large dams, pag 365 - 379 Mexico, 1976.
- 5 - Klohn, E.J.: "The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin", Vol. 65, No. 720, pag. 14 - 30, Montreal, Canada, 1972.
- 6 - Kudelasek, V, et al.: "Metalurgia extractiva de los minerales oxidados de níquel", compendio de artículos, pag. 9-18, Cuba, 1972.
- 7 - Markland, A.; Eurenus, J.: "stability investigations of an -- existing tailings dam", Memories XII Intern. Congress of -- large dams, pag. 407 - 414, Mexico, 1976.
- 8 - Murthy, Y.K., et al.: "Mine tailings dams in India", Memories XII Intern. Congress of large Dams, pag. 599 - 611, -- Mexico, 1976
- 9 - Nechiporovich, A.A.: "Platini iz miestnij materialov", pag. 127, Moscú, URSS, 1973. (en ruso).
- 10- Sobol, S/I., et al.: "Precipitado del concentrado de sulfuro de Ni \wedge Co", Rev. La Minería en Cuba, Vol. 3, No. 2, pag. 6 - 16. Cuba, 1977.
- 11- Zabelin, V.: "Informe geológico con el cálculo de reservas de las colas de la planta "René Ramos Latour", de Nicaro", Empresa de Geología Santiago de Cuba; 1968.