

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA,
MINERA Y METALÚRGICA**



**“MANEJO SOSTENIBLE DE RELAVES DE FLOTACION
DE PLANTAS CONCENTRADORAS DE MINAS
POLIMETALICAS”**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALURGISTA**

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

**PRESENTADO POR:
DIONISIO GUMERCINDO BAZAN ESTEBAN**

LIMA - PERÚ

2005

AGRADECIMIENTOS

A las autoridades y docentes de la Universidad Nacional de Ingeniería por las facilidades brindadas en mi formación académica y técnica en Procesamiento de Minerales y Gestión Ambiental

A la Empresa Consulcont, Smallville y en forma muy especial al MSc. Ing. Carlos Villachica León por haber hecho posible la ejecución del presente Informe.

A mis padres y hermanos quienes me brindaron un apoyo constante en el logro de este objetivo profesional.

DEDICATORIA

A mi madre Filomena por brindarme su eterno cariño, a mi padre Gumersindo, y a Dios por permitir que ellos sigan junto a nosotros, sus hijos.

RESUMEN

En el tratamiento de menas sulfuradas se producen relaves con altos contenidos de pirita que en el futuro se convierten en fuentes generadores de drenaje ácido por lo que su manejo requiere el uso de tecnologías tendientes a evitar esta generación. Además el manejo inadecuado de estos relaves hace que el impacto ambiental sea mayor desde el inicio de las operaciones de los depósitos de relaves. Con el propósito de mitigar este impacto ambiental durante la operación y cierre de los depósitos de relaves, se plantea el manejo sostenible de relaves de flotación de plantas concentradoras polimetálicas. Esta técnica plantea obtener, a partir de los relaves de flotación y mediante el uso de hidrociclones, la mayor recuperación de relave grueso sin disminuir sus propiedades físicas, para la construcción de un dique de presa físicamente estable. Esto permite almacenar mayor cantidad de relave utilizando menos área; esto minimiza el impacto ambiental durante la construcción y operación de la Presa de Relaves. También plantea el iniciar el cierre de la presa de relaves un año antes de su cierre definitivo, recuperando la pirita del dique mediante flotación y encapsularlo en estanque de la Presa de Relaves; y construir durante el último año, un dique con relave neutro, hechos que facilitaran los trabajos de la etapa de cierre de la presa, reflejándose en ventajas técnicas – económicas; y obteniendo como resultado una Presa de Relaves químicamente estable.

INDICE

| | |
|--|----|
| CAPITULO I.-INTRODUCCION | 9 |
| CAPITULOII.-ANTECEDENTES. | 11 |
| 2.1 Manejo de Relaves | 11 |
| 2.2 Problemática Ambiental | 15 |
| 2.3 Método de Construcción de Presas de Relaves | 17 |
| CAPITULOIII.-FUNDAMENTO TEORICO | 21 |
| 3.1.-Conceptos Básicos en el Diseño de Presas de Relaves | 22 |
| 3.1.1 Aspectos Generales | 22 |
| 3.1.2 Características del Underflow en la Presa de Relaves | 22 |
| 3.2.- Clasificación de Relaves con Hidrociclones | 23 |
| 3.3.- Estabilidad Física y Química de Presas de Relaves | 25 |
| 3.3.1.-Estabilidad Física | 25 |
| 3.3.2.- Estabilidad Química | 26 |
| 3.4.- Predicción de Drenaje Acido | 27 |
| CAPITULO IV.- INGENIERIA DEL PROYECTO | 30 |
| 4.1.- Antecedentes | 30 |
| 4.1.1.-Operaciones Metalúrgicas | 30 |
| 4.1.2.-Disposición Actual de Relaves | 31 |
| 4.2.- Manejo Sostenible de los Relaves de Flotación | 33 |
| 4.2.1 Análisis y Selección de Alternativas | 34 |
| 4.2.2 Pruebas de Clasificación de Relaves | 39 |
| 4.2.3 Análisis de Capacidad y Crecimiento de la Presa de Relaves. | 45 |

| | |
|--|----|
| 4.2.4 Sistema de Transporte y Emplazamiento de Relaves | |
| Grueso y Fino | 49 |
| 4.2.5 Sistema de Descarga de Agua Decantada. | 54 |
| 4.2.6 Estabilidad Física de la Presa de Relaves. | 55 |
| 4.2.7 Estabilidad Química de la Presa de Relaves. | 55 |
| 4.2.8 Cierre de la Presa de Relaves. | 57 |
| 4.2.9 Costo de la tecnología aplicada en el cierre de la | |
| Presa de Relaves. | 60 |
| CAPITULO V.- CONCLUSIONES | 61 |
| BIBLIOGRAFIA | 64 |
| ANEXOS | |

CAPITULO I

1.0 INTRODUCCION

En la actualidad, el manejo de relaves es probablemente el mayor problema ambiental que afronta la minería peruana en general; y cumplir con las exigencias legales de límites máximos permisibles de emisiones se hace cada vez más complicado.

Por eso un manejo adecuado de los relaves de flotación teniendo en consideración los aspectos ambientales durante la etapa de diseño, operación, cierre y post cierre, hará que la actividad minera sea sostenible en el tiempo.

El presente estudio muestra como los aspectos ambientales son considerados en las etapas diseño, construcción, operación y cierre de una Presa de Relaves; muestra también nuevas alternativas de clasificación de relaves mediante el uso de los hidrociclones, los cuales nos permiten optimizar el tiempo de vida de una Presa de Relaves trayendo como consecuencia un menor impacto ambiental en lo que se refiere a áreas verdes. El estudio presenta también nuevas alternativas de transporte, emplazamiento y cierre de Presas de Relaves, los cuales hacen que el manejo de relaves no sea un problema ambiental en el tiempo.

Un estudio más detallado del manejo de los hidrociclones y el manejo de pulpas, nos dará alternativas ventajosas en el manejo de relaves. En este estudio solo se ha aprovechado el uso de los hidrociclones en el diseño de Presas de Relaves.

Si bien es cierto, en el diseño de presas de relaves, encontraremos la participación de otros profesionales, tales como los geotécnicos, hidrólogos, biólogos y otros, el metalurgista es el llamado a dirigir estos proyectos y hacerlos factibles.

CAPITULO II

2.0 ANTECEDENTES

2.1 MANEJO DE RELAVES

Históricamente el manejo de los relaves estaba en función de maximizar el rendimiento económico y se descargaban en los ríos y quebradas y a consecuencia de demandas judiciales por contaminación, se construyen presas de relaves, en primera instancia del tipo aguas arriba que posteriormente van evolucionando a tecnologías que garantizan un mejor manejo. En el manejo de relaves hay que distinguir etapas como: operación, cierre y post cierre.

A continuación presentamos los métodos de disposición de relaves¹:

a.- Presas de Relaves.- Son construidas con el mismo relave; el cual es sometido a un proceso de clasificación mediante un hidrociclón y se generan dos productos: un relave grueso y un relave fino; el relave grueso es utilizado para construir el dique de la presa y el relave fino viene a constituir la poza de finos. Básicamente existen tres métodos de construcción de presas de relaves: Aguas Arriba, Aguas Abajo y Línea Central.

b.- Fondo de Cuerpos Acuáticos.- En casos en que por razones topográficas, geológicas, edafológicas o hídricas, no es posible ubicar los

depósitos de los relaves en zonas cercanas, éstos pueden ser conducidos y depositados en el fondo de los cuerpos lacustres o del mar, garantizando la estabilidad física y química de los relaves de manera que no constituya un riesgo para la flora y fauna marina o lacustre. Se autoriza la disposición de relaves en fondos acuáticos cuando el volumen de material imposibilita su acumulación en quebradas, o al hacerlo en tierras planas impedirían su futuro aprovechamiento agrícola, las deterioren, o en los que podrían presentarse casos de percolación o se trate de zonas sísmicas o que pudieran generar impactos ambientales.

Los análisis de estabilidad de este tipo de represas son similares a los usados para diseñar cualquier otra estructura, añadiendo el análisis estático de la estabilidad del talud, la aceleración de una fuerza horizontal como producto de un determinado movimiento sísmico, realizar un análisis de suelos desde una dinámica triaxial y otras pruebas.

c.- Relleno Subterráneo.- Conocido como RELLENO HIDRÁULICO, es otra forma de disposición de los relaves, constituyéndose además como una alternativa para la prevención de la contaminación ambiental. Prácticamente, es posible retornar la mitad o hasta dos tercios de los relaves producidos a las labores explotadas en las minas subterráneas, por ejemplo la CIA. Minera Milpo retorna el 70% de sus relaves. En minería es uno de los tantos métodos de relleno de los espacios vacíos dejados por la explotación minera, en el cual, el material relleno es el relave producido en las plantas de concentración que son transportados como pulpas y el nombre de relleno hidráulico, precisamente se debe al tipo de transporte

empleado o sea transporte de sólidos mezclados con agua que adquiere propiedades hidráulicas. Esta técnica tiene amplia aceptación en la minería subterránea, desde el punto de vista de manejo de relaves como desde el punto de vista del relleno.

d.- Disposición sub-aérea.- Denominado debajo del aire, originalmente fue empleada y desarrollada para lamas de oro en África del Sur, en este método los relaves son descargados en capas delgadas que se dejan secar bajo el calor de los climas calientes y secos, resultando en depósitos que tienen un alto grado de sobre consolidación y/o presión de poros negativos (succión capilar), mejorando así las características físicas de los lodos, en comparación a los almacenados en forma convencional. La disposición sub-aérea en otros lugares, reproduce estos procedimientos empleando el espesamiento de los relaves cuando es necesario, descargándolo en capas finas a partir de grifos espaciados muy cerca uno del otro y manteniendo una poza de decantación pequeña que se controla cuidadosamente. A menudo se colocan drenajes en la parte inferior de los depósitos de relaves como parte de las técnicas sub-aéreas, con el fin de disminuir la presión de los poros negativos en la porción de los relaves finos.

e.- Descarga espesada.- Se basa en la eliminación de la mayor cantidad de agua de los lodos de relaves, mediante espesamiento hasta por lo menos 50 a 60% de sólidos en peso, estos lodos pueden alcanzar inclinaciones de 3 a 6 grados cuando son depositados a partir de una tubería, esta técnica reduce la extensión del área de construcción de la represa. Las condiciones de saturación con agua de estos depósitos, posiblemente, mitigan el

desarrollo del Drenaje Ácido de Relave (DAR), pero al igual que cualquier relave saturado, los espesados permanecerán susceptibles a la licuefacción sísmica, por tanto será necesario una completa desaturación del depósito para garantizar su estabilidad.

f.- Relaves Deshidratados.- La eliminación del agua se puede lograr mediante filtros de vacío, de presión, de tambor, de faja y/o centrífugos, hasta reducir el contenido de agua a unos 20 a 25% en peso. Aunque los costos de operación y de capital pueden ser altos y que requieren un sistema de disposición de relaves de respaldo, este método ofrece ventajas únicas para minas ubicadas en zonas estrechas y montañosas.

g.- Métodos Combinados.- En lugares con áreas restringidas, de topografía accidentada, etc., es más conveniente emplear métodos combinados de disposición de relaves, así, el relleno hidráulico puede ser complementado con instalaciones de eliminación del agua de los relaves para el material remanente, este método es empleado con éxito en algunas minas del Perú. Alternativamente, las arenas cicloneadas pueden ser retornadas al subsuelo como relleno mientras que las lamas remanentes bombeadas a distancias mucho mayores, pero al mismo tiempo, mucho más convenientes. El problema de la generación del Drenaje Ácido de Relave (DAR), asociada con relaves sulfurosos, originan combinaciones novedosas, como la disposición subacuática de las arenas cicloneadas, mientras que las lamas son depositadas en superficie o la separación de la pirita de los relaves por flotación para ser usado como relleno hidráulico, dejando los sólidos más estables para ser dispuestos en superficie.

h.- Flotación Total.- En tratamiento de sulfuros polimetálicos, C. Villachica planea una nueva filosofía de tratamiento, denominada “Flotación Total” ², que permite lograr recuperaciones similares o mayores que los sistemas convencionales, junto con relaves mucho más gruesos y se considera una nueva filosofía por que el relave final es el primer producto y no el último como se consideran en los procesos convencionales. Esta técnica consiste en realizar una molienda gruesa del mineral y flotar todo el material valioso (Cu, Pb, Zn) junto con la pirita, obteniendo un concentrado bulk y un relave libre de sulfuros. El concentrado bulk será tratado de manera convencional, con la ventaja que todo el proceso requerirá una Planta Concentradora de menor capacidad y los costos serán mucho menor. El relave que se obtiene de este proceso, libre de sulfuros, asegurará su estabilidad química en el tiempo.

2.2 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

Hay dos consideraciones que se deben tomar en cuenta cuando se opta manejar los relaves mediante una Presa de Relaves: la estabilidad Física y la estabilidad Química. Los antecedentes nos muestran que en años anteriores estos dos aspectos no fueron considerados en el diseño de Presas de Relaves, motivo por el cual varias presas han fallado trayendo consigo un impacto ambiental grave sin contar las vidas humanas que se perdieron en ese instante, como se muestra en la tabla 2.1. Y en lo que respecta a la estabilidad química los antecedentes muestran la indiferencia que ha habido en el cuidado del medio ambiente al diseñar las Presas de Relaves ³ como se aprecia en la tabla 2.2 y 2.3.

Tabla 2.1.-Fallas significativas de Flujo en Presas de Relaves

| Nombre | Ubicación | Fecha | Tipo de Represa | Origen de Falla | Fatalidad | Referencia |
|---------------|-----------|-------|-----------------|-----------------|-----------|-----------------------|
| Barahona | Chile | 1 928 | Aguas Arriba | Terremoto | 54 | Brawner, 1 979 |
| Dos Estrellas | México | 1 937 | Aguas Arriba | Infiltración | 70 | ENR, 1 937 |
| El Cobre | Chile | 1 965 | Aguas Arriba | Terremoto | >200 | Dobry & Alvarz, 1 967 |
| Bafokeng | Sudáfrica | 1 974 | Aguas Arriba | Infiltración | 12 | Jennings, 1 979 |

Guía para el manejo de Relaves de Minas y Concentrados, Pág. 77.
Ministerio de Energía y Minas – República del Perú

*Tabla 2.2.- Presas de Relaves en la Sierra Central del Perú.

| Nombre | Fecha de Cierre | Método de Construcción | Talud (años) | Antigüedad | DAR |
|-------------------|-----------------|------------------------|--------------|------------|-----|
| Yauliyacu Nuevo | 1 982 | Aguas Arriba, CC | 22 | 19 | SI |
| Bellavista | 1 964 | Aguas Arriba, SC | 50 | 52 | SI |
| Tablachaca | | Aguas Arriba, CC | 37 | | SI |
| Chinchán | | Aguas Abajo, CC | 24 | 15 | NO |
| Antuquito | | | | | SI |
| Casapalca | 1 949 | Aguas Arriba, SC | 50 | 76 | SI |
| Yauliyacu Antiguo | 1 983 | Aguas Arriba, CC | 22 | 34 | SI |

Datos obtenidos del Estudio de Estabilidad Química de Presas de Relaves.

*Tabla 2.3.- Valores de AP, NP, NNP para los Relaves de Plantas Concentradoras

| Relave | NP | AP | NNP | NP/AP |
|-------------------|-----------|-------|--------|-------|
| Cerro de Pasco | 45 | 1 170 | -1 125 | 0,04 |
| Cobriza | 65 | 574 | -509 | 0,11 |
| Yauricocha | 258 | 603 | -345 | 0,43 |
| Morococha | 11 | 287 | -276 | 0,04 |
| Yauliyacu | 105 | 255 | -150 | 0,41 |
| San Cristobal | 103 | 128 | -25 | 0,80 |
| Andaychagua | 120 | 102 | 18 | 1,18 |
| Valor recomendado | mayor que | | 20 | 3,0 |

Datos obtenidos del Estudio de Estabilidad Química de Presas de Relaves.

Ver capítulo 3.4: Predicción de Drenaje Ácido.

* CONSULCONT 1988 ³

A partir de estos antecedentes se ha trabajado bastante en la estabilidad física de la Presa de Relaves logrando presas grandes y seguras. Pero en lo que respecta a la estabilidad química de Presas de Relaves, recién a partir de la década del 90 se ha dado un creciente reconocimiento de que los depósitos de relaves, aún los físicamente estables, no pueden ser abandonados sin considerar sus efectos a largo plazo sobre el ambiente, la salud y la seguridad. Entre estos efectos se puede mencionar la ingestión directa de las partículas finas llevadas por el viento, el más severo de todos; la generación de aguas ácidas, que a su vez, llevan metales en solución. La tecnología para la mitigación del DAR aún está poco desarrollada y las soluciones son específicas para cada caso, por lo tanto ningún programa sistemático de manejo de relaves llegará lejos a menos que sus objetivos sean claramente expresados desde la etapa de planificación, construcción, cierre y post-cierre de Presa de Relaves. Con el fin de mitigar la generación de aguas ácidas a partir de relaves de plantas concentradoras, se han desarrollado muchos trabajos de investigación y tecnologías que pueden ser aplicados en las diferentes etapas, como: acondicionamiento de los estériles, recubrimientos y sellado, depósitos subacuáticos, mezclado de materiales estériles y vertido selectivo con materiales alcalinos, uso de bactericidas y otros.

2.3 METODO DE CONSTRUCCION DE PRESAS DE RELAVES

Básicamente existen tres tipos de construcción de Presas de Relaves ², los cuales se detallan a continuación y se muestran en la figura 2.1, 2.2 y 2.3.

Método Aguas Arriba.- La represa inicial se construye en la zona aguas abajo y es importante que esta represa inicial sea lo suficientemente permeable al paso de las aguas de filtración y que la porción aguas debajo de la represa sea diseñado para resistir los poros de agua y aire retenidos. Los relaves son descargados en la parte superior de la represa inicial usando mangueras o ciclones para desarrollar un dique compuesto de la fracción gruesa del relave. La línea central de la cresta de la represa se desplaza hacia el área de la laguna conforme aumenta la altura de la represa y el extremo aguas debajo de cada etapa subsiguiente, se apoya sobre la parte superior del dique de gruesos, junto con la porción aguas arriba del dique ubicado sobre los relaves finos, como resultado, la superficie exterior contribuye menos a la estabilidad conforme aumenta la altura. La estabilidad de estas represas es pobre y puede fallar por licuefacción si es expuesta a un choque sísmico. Las vibraciones pueden ser producidas por terremotos, explosiones, camiones pesados etc. Ver figura 2.1.

Método Aguas Abajo.- En este método la línea central o cresta de la represa se desplaza aguas abajo conforme aumenta la altura de la represa. También se requiere de una represa inicial que debe ser impermeable, por esto la represa inicial, generalmente es construido con material prestado y compactado. Cada etapa subsiguiente de la construcción del dique se apoya en la parte superior del talud aguas debajo de la sección anterior y si los relaves son empleados durante la etapa de la construcción, sólo deberá emplearse la parte gruesa. Antes de realizar una nueva extensión aguas abajo, deberá prepararse cama permeable de drenaje de por lo menos de

0,90 m de espesor o sistemas de canales alternativos para reducir la posibilidad de formación de poros de agua que son causantes de la reducción del esfuerzo al corte. Si la represa está ubicada en zonas sísmicas y/o su altura excediera los 15 m, deberá compactarse la extensión aguas abajo. Para minimizar la filtración, en represas construidas con relaves es recomendable que la cara aguas arriba sea sellada, frecuentemente con suelo impermeable o depositando la parte fina de los relaves sobre la cara del talud aguas arriba. Ver figura 2.2.

Método de Línea Central.- En este método la cresta se mantiene en la misma posición horizontal conforme aumenta la altura de la represa, el incremento de la altura de la represa se hace extendiendo y compactando el relave grueso adicional en la parte superior sobre las caras aguas arriba y aguas abajo, la graduación de la parte gruesa del relave es importante para proporcionar un drenaje rápido y para soportar el equipo de construcción. Con excepción de las represas pequeñas, los relaves ubicados sobre el talud aguas abajo deben ser siempre compactados, por el hecho de que uno de los criterios más importantes de estabilidad de represas en tierra, es desarrollar la máxima estabilidad en el extremo y áreas del talud aguas abajo. Ver figura 2.3.

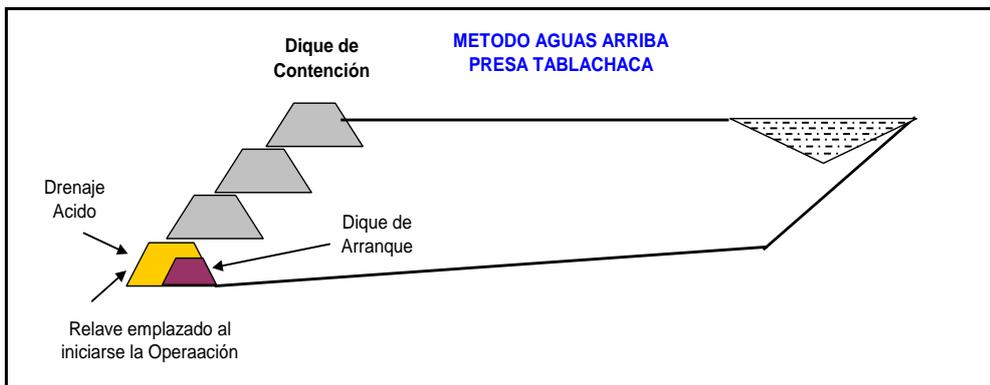


Figura 2.1

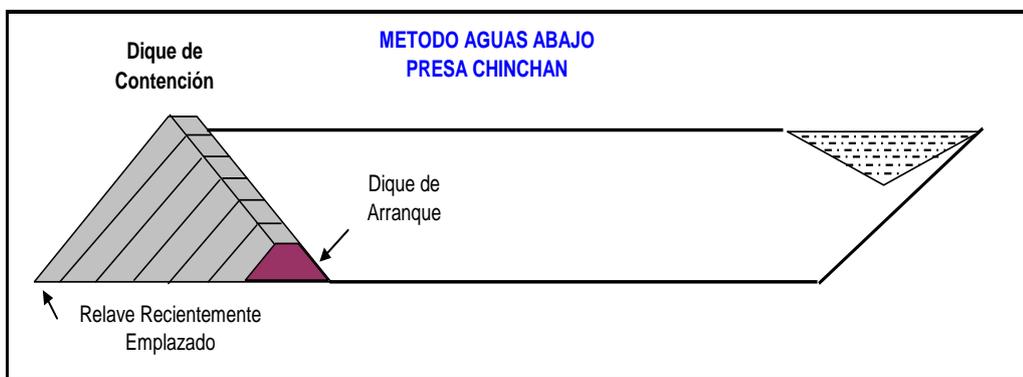


Figura 2.2

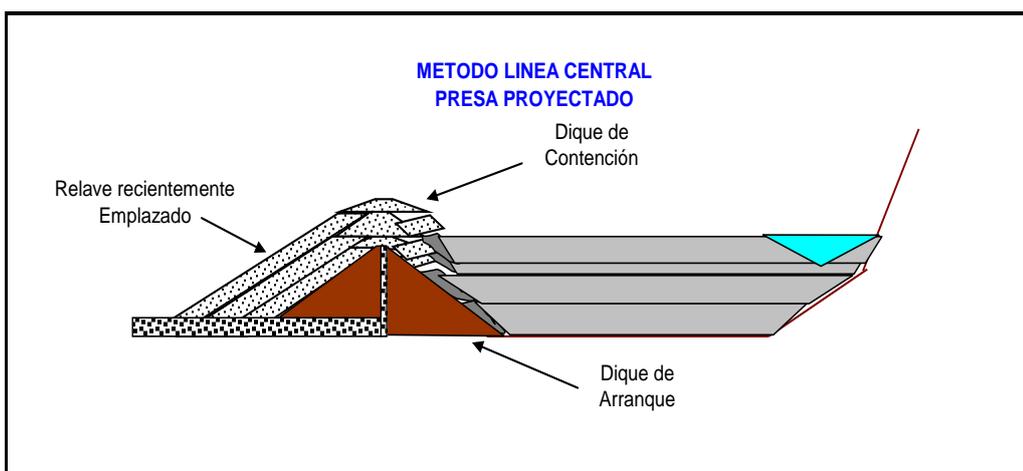


Figura 2.3

CAPITULO III

3.0 FUNDAMENTO TEORICO

3.1 CONCEPTOS BASICOS EN EL DISEÑO DE PRESAS DE RELAVES

3.1.1 Aspectos Generales

En el Diseño de una Presa de Relaves se recomienda tener las siguientes consideraciones:

- Aspecto Ambiental; determina el área que sea de menor impacto ambiental, tomando en consideración las áreas verdes en todo el proyecto.
- Levantamiento Topográfico del Área; nos ayuda a determinar el área de trabajo y el ambiente circundante a este, además nos servirá para determinar los cálculos de movimiento de tierra, y volumen y tiempo de vida de la Presa de Relaves.
- Estudios de Geología y Sísmicidad Local; nos determina los tipos de suelos que se encuentran en el área del proyecto, además nos dará información de que materiales son útiles o no para el proyecto.
- Estudios Hidrológicos; permite conocer las escorrentías (aguas superficiales) y posibles avenidas de agua que puedan pasar por el

área del proyecto y así determinar los canales de derivación a construirse para proteger la Presa de Relaves.

- Estudio Geotécnico del Eje de la Presa y del Estanque; nos determina la calidad de suelo (perfil estratigráfico) y si este soportará el peso de la Presa de Relaves, además nos determina las características del relave grueso y del relave fino, los cuales son necesarios para las simulaciones geoténicas y determinar el Factor de Seguridad de la Presa de Relaves.
- Diseño de la Presa de Arranque, Cuerpo de la Presa y Estanque; se realiza una serie de cálculos para optimizar el tamaño de la Presa de Arranque y la geometría del Cuerpo de la Presa y Estanque.
- Diseño del Sistema de Drenaje y Filtro de la Presa; el sistema de drenaje permitirá capturar todo el agua subterránea de la poza de finos, y el filtro todo el agua proveniente del relave grueso que conforma el dique de la Presa
- Análisis de Flujo, Estabilidad de Taludes y de Esfuerzos; permite conocer la estabilidad física de la Presa de Relaves
- Elaboración del Plan de Cierre.

3.1.2 Características del Underflow en la Presa de Relaves.

Según Lara-Barrera Vivanco ⁴, las características que deben tomarse en cuenta en las arenas cicloneadas (underflow) para la construcción de dique de contención en la Presa de Relaves son las siguientes: granulometría, densidad de compactación, permeabilidad, resistencia al corte estático,

resistencia cíclica. Todos estos parámetros están considerados en el factor de seguridad de la Presa de Relaves.

El parámetro que se toma inicialmente para determinar que relave puede ser adecuado para la construcción de un dique de Presa de Relaves es la granulometría, la cual según Sergio Barrera, debe contener menos del 20 % de material fino (- m 200).

En la tabla 3.1 se presenta las Presas de Relaves con su contenido de finos en las arenas que conforman el dique de contención de la Presa de Relaves. Se observa que los finos están en el rango de 20 - 25 %.

Tabla 3.1.- Características de Arenas Cicloneadas en Presas de Relaves

| Características de Arenas Cicloneadas | | |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|
| Depósito | Contenido de Finos (%) | Gravedad Específica |
| Las Tórtolas | 12-13 | 2,71 |
| El Torito | 16-18 | 2,69 |
| El Cobre N°4 | 18-25 | 2,68 |
| El Chinche | 14-17 | 2,69 |
| Ovejería | 14-15 | 2,74 |
| Quillayes | 13-15 | 2,69 |

Presas de Relaves en Chile, Lara-Barrera, Minería 298, pagina 27

3.2. CLASIFICACION DE RELAVES CON HIDROCICLONES

En la construcción de Presas de Relaves un equipo muy utilizado es el hidrociclón. Este equipo recibe por alimento un relave con una granulometría determinada y genera dos productos: Underflow, relave con granulometría más gruesa que el alimento (arenas) y; Overflow, relave con granulometría más fina que el alimento (lomas).

El manejo adecuado de los parámetros que rigen el funcionamiento del hidrociclón, nos permitirá alcanzar los productos que se requieren para la construcción de una Presa de Relaves.

Variables Relacionadas con un Hidrociclón: ⁵

- Diámetro del hidrociclón; es un hecho comprobable que el valor del d_{50} , es proporcional al diámetro del hidrociclón, de lo que se infiere que diámetros mayores producirán tamaños mayores de d_{50} debido a que originan fuerzas acelerativas menores.
- Vortex Finder; a mayor diámetro del vortex se obtendrán valores mayores de d_{50} . El vortex al aumentar de tamaño permite una mayor capacidad del hidrociclón.
- Diámetro de Apex; es quizás la variable más importante de la operación del hidrociclón por la facilidad con que puede ser modificada a fin de lograr las condiciones de clasificación requeridas. Su relación con el d_{50} , es de proporcionalidad inversa, es decir que a mayor diámetro de apex menor d_{50}

Variables relacionadas con la pulpa alimentada:

- Porcentaje de Sólidos; su incremento aumenta el d_{50} y disminuye la precisión de separación. El porcentaje de sólidos para una operación eficiente no debería pasar del 30%.
- Caudal de pulpa que se alimenta al hidrociclón; depende fundamentalmente del diámetro del vortex, de la caída de presión y del porcentaje de sólidos. El valor del d_{50} varía en relación inversa al valor del caudal.
- Incremento de presión de alimentación; a mayor presión menores d_{50} . Los rangos habituales de presión de alimentación se encuentran entre 8,5 y 9 psi.

3.3. ESTABILIDAD FISICA Y QUIMICA DE PRESAS DE RELAVES

3.3.1. Estabilidad Física

Podemos hablar de dos tipos de estabilidades físicas en una Presa de Relaves: ⁶

a.- Estabilidad Estática; la cual se refiere a la integridad interna y externa de la presa bajo condiciones no sísmicas y no hidrológicas, incluyendo la estabilidad de sus taludes y sus cimientos contra deslizamientos; un control seguro de infiltraciones; y resistencia a la erosión interna, o transporte de partículas a través de la misma presa conocido como “socavamiento”. La estabilidad estática está controlada por las propiedades de los materiales de relleno de la presa y los suelos en los cuales se asientan.

b.- Estabilidad Pseudoestática; la estabilidad sísmica o pseudoestática tiene importancia solamente durante la operación y poco tiempo después durante periodos usualmente asociados con la etapa de clausura. La seguridad sísmica post clausura del embalse contra deslizamientos esta asegurada virtualmente supuesto que no permanece agua en su superficie.

Existe un Factor de Seguridad (FS) el cual nos permite determinar si la Presa de Relaves es físicamente estable. Ver tabla 3.2

Tabla 3.2 Resumen de Factores de Seguridad

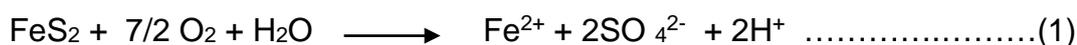
| TIPO DE ANALISIS | FACTOR DE SEGURIDAD | | | |
|--------------------|---------------------|-----------------|------------|------------|
| | ESTATICO | PSEUDO ESTATICO | POST SISMO | RESIDUALES |
| F.S. MINIMO | 1,4 | 1,0 | 1,0 | |

FUENTE: HIDROENERGIA 2002

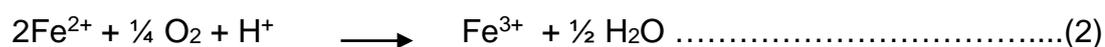
3.3.2. Estabilidad Química

La estabilidad química de las Presas de Relaves está ligada directamente en la generación de DAR producida por la presencia de pirita en los relaves, la cual es la principal acompañante en los materiales valiosos en nuestras minas poli metálicas. Dependiendo del diseño de la Presa de Relaves esta puede generar DAR durante la operación, en el cierre o en el post cierre. Generalmente ocurre en la etapa de cierre y post cierre, cuando los relaves quedan expuestos al agua y aire; generando reacciones químicas, las que subsecuentemente generan el DAR. ⁷

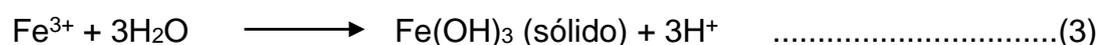
La primera reacción importante es:



Los productos disueltos representan un incremento en el total de sólidos disueltos y de ácidos del agua y a menos que sea neutralizada, el incremento de la acidez estará asociado con una disminución del pH. En presencia de suficientes oxidantes, ocurre la reacción



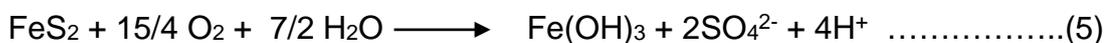
Y a pH superior a 3,5 se precipita el hidróxido férrico



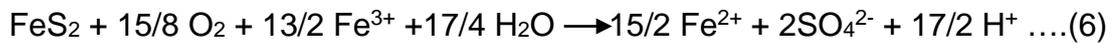
Algunos cationes férricos que no precipitan, pueden seguir oxidando adicionalmente la pirita:



Una reacción simplificada de la generación de ácido a partir de la pirita es:



Por otra parte el total de reacciones para estabilizar el férrico que es usado para oxidar más pirita es:



La presencia de ciertas bacterias, como el Thiobacillus Ferrooxidans, acelera la velocidad de las reacciones de formación de aguas ácida.

3.4. PREDICCIÓN DE DRENAJE ACIDO DE MINA

La capacidad de generación del DAM (DAR) puede ser estimada y cuantificada para cada mineral. El **Potencial Neto de Neutralización (NNP)**, es aceptado internacionalmente como un parámetro para caracterizar este fenómeno y se determina del siguiente modo (C.Villachica – J.Llamosas) ⁸.

Potencial Acido (AP).-Es la capacidad de un mineral para generar ácido y depende de su contenido de sulfuros. Se determina multiplicando el % de azufre como sulfuro por 31,25.

Potencial de Neutralización (NP).- Es la capacidad de un mineral para consumir/neutralizar ácido y se determina por titulación ácido-base de una muestra del relave u otro producto.

Potencial Neto Neutralizante (NNP).- Es la capacidad de un mineral de generar o consumir ácido y es igual a:

$$\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP}$$

Todos los parámetros se expresan en Kg. de CaCO_3 / TM , en general es una regla aceptada que no se producirá DAM si:

$$\text{NNP} > +20 \text{ Kg } \text{CaCO}_3/\text{ TM } \quad \text{y} \quad \text{NP/AP} > 3$$

Del mismo modo existe un rango de incertidumbre, para valores en el rango de:

-20 < NNP < +20, en este caso el DAM puede prevenirse a través de medidas de mitigación, ver figuras 3.1 y 3.2.

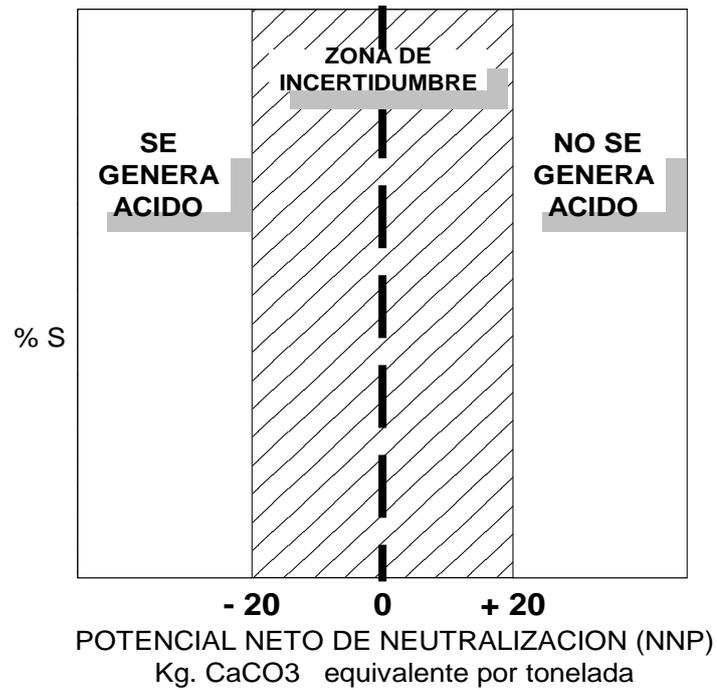


Figura 3.1.- Interpretación de la Relación Acido-Base por pruebas NNP

FUENTE : Guía Ambiental para el manejo de Drenaje Acido de Minas, Volumen IV, Pág. 61. República del Perú-Ministerio de Energía y Minas, 1995

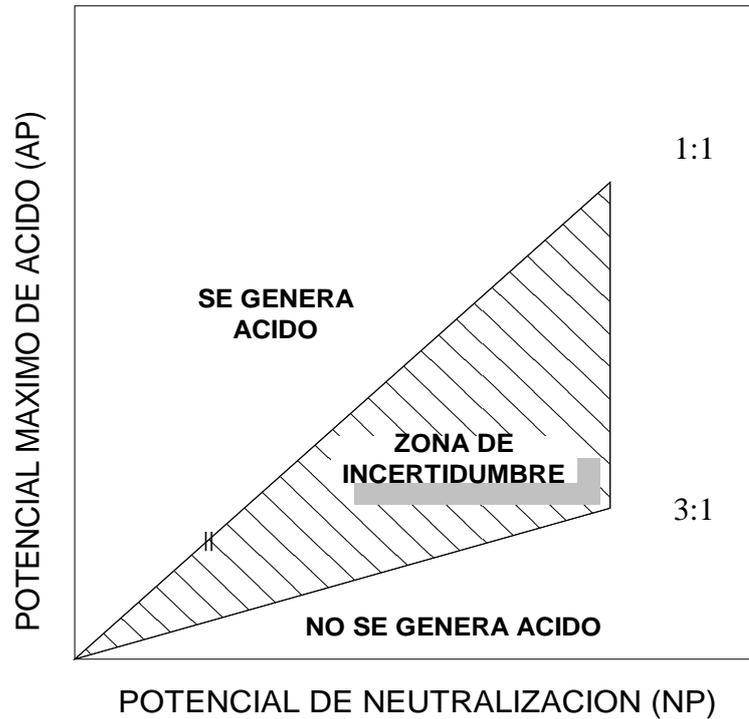


Figura 3.2- Interpretación de la Relación Acido-Base por pruebas de Radio

FUENTE : Guía Ambiental para el manejo de Drenaje Acido de Minas, Volumen IV, Pág. 61. República del Perú-Ministerio de Energía y Minas, 1995.

Determinación del AP, NP y NNP

La evaluación de la relación ácido-base de las rocas y/o relaves se desarrollaran mediante pruebas de predicción estática de DAM. En los trabajos relacionados al control medio ambiental de la minería peruana, es de amplio uso la determinación del NP y AP y por ende del NNP. Los métodos para determinar el NNP y otros métodos de predicción estática están disponibles con detalle en el Prediction Test Procedure Manual (CANMET-MEND, 1990) ⁹. En este trabajo la determinación del AP, NP y NNP ha sido desarrollo, en los laboratorios de CONSULCONT S.A..C.

CAPITULO IV

4.0 INGENIERIA DEL PROYECTO

4.1. ANTECEDENTES

4.1.1. Operaciones Metalúrgicas

La Planta Concentradora para la cual se ha realizado el diseño de la Presa de Relaves está situada en la sierra central; tiene una capacidad de procesamiento instalada de 2 000 TMPD de mineral y trata un promedio de 1 964 TMPD de un mineral polimetálico de cobre, plomo, zinc y plata.

En la Planta Concentradora el mineral se procesa en las siguientes secciones:

- Recepción de minerales.
- Trituración.
- Molienda.
- Flotación.
- Sedimentación.
- Filtrado.
- Clasificación de Relave.
- Despacho de Concentrados
- Fundición y Moldeo.

El Balance Metalúrgico de esta operación y el análisis granulométrico del relave se presentan en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1 Balance Metalúrgico de la Planta Concentradora
(Balance acumulado al 31 de diciembre del 2000)

| Producto | TMPD | % Peso |
|----------------|---------|-----------|
| Mineral Fresco | 1 964,0 | 100,00 |
| Concentrado Cu | 25,5 | 1,30 |
| Concentrado Pb | 31,8 | 1,62 |
| Concentrado Zn | 203,7 | 10,37 |
| Relave Final | 1 703,0 | 86,71 |

Tabla 4.2 Análisis granulométrico del Relave
(Realizado el 29 de marzo del 2001)

| Mallas | Peso gr. | Peso % | Ac (-) % |
|----------|-------------|-----------|-------------|
| 20 | 0,322 | 0,04 | 99,96 |
| 35 | 2,933 | 0,37 | 99,59 |
| 50 | 24,294 | 3,09 | 96,49 |
| 70 | 55,985 | 7,13 | 89,37 |
| 100 | 51,391 | 6,54 | 82,82 |
| 150 | 95,847 | 12,20 | 70,62 |
| 200 | 68,807 | 8,76 | 61,86 |
| 325 | 109,454 | 13,93 | 47,93 |
| 400 | 26,168 | 3,33 | 44,60 |
| 635 | 85,246 | 10,85 | 33,75 |
| -635 | 265,092 | 33,75 | 0,00 |
| | 785,539 | 100,00 | |
| %Sólidos | 28,68 | | |

Diariamente se producen alrededor de 261 TM de concentrados y 1 703 TM de relaves de flotación.

4.1.2. Disposición Actual de Relaves

El Relave de Flotación es un producto sin valor comercial que se obtiene en forma de pulpa con una concentración en el orden de 30 % sólidos. Esta pulpa se diluye hasta 27% sólidos y se conduce mediante bombeo y una

tubería de 1 242 m y 10" Ø, hasta la Cancha de Relaves Actual. Allí se bombea a un hidrociclón de 20" Ø que separa la pulpa en una fracción de relave fino y otra de relave grueso. El relave grueso se emplea para construir el Dique que confina a la pulpa de relave fino. La proporción de relave de flotación de grueso y fino depende de las dimensiones y parámetros de operación de los hidrociclones, y en la actualidad solo el **21%** del peso de relave fresco se obtiene como relave grueso. Cuanto menor sea esta proporción menor será la competencia del Dique de contención y mayor la inclinación del talud aguas abajo. La Presa de Relaves actualmente es Aguas Arriba. La distribución del relave en la Presa de Relaves y su potencial de generar aguas ácidas se presentan en las Tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3 Balance de Masa en la Presa de Relaves Actual
(Balance al 31 de diciembre del 2000)

| Circuito de Clasificación | ACTUAL | |
|---------------------------|--------------|--------------|
| | TMPD | Dtbn. % |
| Relave Grueso (U/F) | 358 | 21 |
| Relave Fino (O/F) | 1 345 | 79 |
| Relación Vol. U/F a O/F | 0,49 | |
| Relave Original | 1 703 | 100,0 |

Tabla 4.4 Distribución del Azufre en el ciclón actual D-20

| Tipo de Relave | % S _s | AP | NP | NNP | NP/AP |
|---|------------------|-------|------|---------------|-------------|
| Alimento | 6,6 | 206 | 52,8 | -153,5 | 0,26 |
| Underflow | 8,2 | 250 | 27,5 | -222,5 | 0,11 |
| Overflow | 6,2 | 193,8 | 54,3 | -139,5 | 0,28 |
| <i>Para garantizar que no habrá drenaje ácido debe ser mayor que:</i> | | | | + 20,0 | 3,00 |

4.2. MANEJO SOSTENIBLE DE LOS RELAVES DE FLOTACION

El buen manejo de los relaves de flotación se inicia con una selección del lugar donde se depositarán los relaves, el método de disposición de los relaves en dicha área geográfica y la forma de emplazar los relaves en esta zona.

En este caso se analizó una serie de alternativas de ubicación, tomando como método de disposición de relaves, la Presa de Relaves. Se determinó la ubicación más adecuada teniendo en cuenta los costos y los aspectos ambientales. En esta zona se realizó una serie de estudios geotécnicos e hidrológicos para determinar la factibilidad de la construcción de la Presa de Relaves, los cuales no se mencionarán en este estudio, pero son de vital importancia para la construcción de la Presa de Relaves. Una vez que se determinó la zona óptima, se realizaron una serie de cálculos para optimizar el tiempo de vida de la Presa de Relaves. Paralelo a esto se realizaron pruebas de clasificación de relaves, con hidrociclones para determinar la recuperación del relave en el underflow.

Geométricamente en la construcción de Presa de Relaves, a mayor recuperación en el underflow, el cual conforma el dique, mayor tiempo de vida de la Presa de Relaves. Geotécnicamente a mayor cantidad de finos en el underflow la estabilidad física es menor. Se debe mencionar que la compactación del underflow aumenta la estabilidad física del dique, pudiendo tener así mayores taludes y mayor tiempo de vida de la Presa de Relaves. Por tanto se buscó un equilibrio entre estos parámetros para definir la construcción de la Presa de Relaves.

La Presa de Relaves que se eligió construir fue una de Línea Central con el dique compactado formando andenes. El cual con las características del underflow elegido aseguran la estabilidad física de la Presa de Relaves, como se mostrará más adelante. La estabilidad química está asegurada durante la operación ya que siempre se tendrá relave fresco en la superficie del dique, y en la etapa de cierre se cubrirá esta superficie con relave neutro y con tierra natural, la cual asegurará la estabilidad química de la Presa de Relaves en el tiempo.

4.2.1 Análisis y Selección de Alternativas

En esta sección se analizan las tres alternativas de ubicación para el almacenamiento de los relaves además de una cuarta alternativa que compara la construcción del Dique con relave o material de préstamo, en la última alternativa. Este análisis considera la evaluación técnica y económica para la construcción y operación de los depósitos en los sitios mencionados. Para realizar esta evaluación se realizó un diseño básico del Depósito de relaves en cada uno de los lugares propuestos.

Los parámetros de diseño y características que conforman estas alternativas, se presentan en las tablas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9.

Tabla 4.5 Descripción de la Alternativa A para Depósito de Relaves

| | |
|---|--------------------------|
| Dique de Relave | Relave Grueso Cicloneado |
| Talud aguas abajo | 2,65H :1V |
| Talud aguas arriba | 1,5H : 1V |
| Cota base | 4 005 msnm |
| Cota de Corona | 4 012 msnm |
| Altura de Dique | 7,0 m |
| Ancho Corona | 8,0 m |
| Longitud de Corona | 267 m |
| Volumen de Dique | 180 851 m ³ |
| Peso Unitario Compactado | 2,03 TM/ m ³ |
| Peso Compactado | 367 851 TM |
| Estanque del Depósito | Relave Fino Cicloneado |
| Cota base | 4 005 msnm |
| Cota máxima | 4 010 msnm |
| Profundidad del Estanque | 5 m |
| Volumen | 359 373 m ³ |
| Peso Unitario | 1,13 TM/ m ³ |
| Peso | 406 091 TM |
| Borde libre | 2 m |
| Dique de Arranque | Material de préstamo |
| Cota Base | 4 005 msnm |
| Cota de Corona | 4 007 msnm |
| Altura | 2 m |
| Ancho de Corona | 8 m |
| Talud | 2,0H :1V |
| Volumen | 35 246 m ³ |
| Peso Unitario | 2,10 TM/ m ³ |
| Peso | 74 017 TM |
| Presa de Relaves | |
| Volumen Total | 575 470 m ³ |
| Excavación para Cimentación | 31 392 m ³ |
| Material de Préstamo | 77 401 m ³ |
| Importación de Material de Préstamo | 0 m ³ |
| Capacidad de Almacenamiento | 773 942 TM |
| Eficiencia de Capacidad (por m ³ de Dique) | 3,58 TM/ m ³ |
| Tiempo de Vida | 1,2 años |
| Distribución de Relave, al Dique | 51,1 % |
| Distribución de Relave, al Estanque | 48,9 % |

Tabla 4.6 Descripción de la Alternativa B para Depósito de Relaves

| | |
|---|--------------------------|
| Dique de Relave | Relave Grueso Cicloneado |
| Talud aguas abajo | 2,65H :1V |
| Talud aguas arriba | 1,5H : 1V |
| Cota base | 4 064 msnm |
| Cota de Corona | 4 086 msnm |
| Altura de Dique | 22 m |
| Ancho Corona | 6 m |
| Longitud de Corona | 976 m |
| Volumen de Dique | 620 086 m ³ |
| Peso Unitario Compactado | 2,03TM/ m ³ |
| Peso Compactado | 1 261 255 TM |
| Estanque del Depósito | Relave Fino Cicloneado |
| Cota base | 4 064 msnm |
| Cota máxima | 4 084 msnm |
| Profundidad del Estanque | 20 m |
| Volumen | 826 040 m ³ |
| Peso Unitario | 1,13 TM/ m ³ |
| Peso | 933 425 TM |
| Borde libre | 2 m |
| Dique de Arranque | Material de préstamo |
| Cota Base | 4 064 msnm |
| Cota de Corona | 4 072 msnm |
| Altura | 8 m |
| Ancho de Corona | 6 m |
| Talud | 2,0H :1V |
| Volumen | 201 156 m ³ |
| Peso Unitario | 2,10 TM/ m ³ |
| Peso | 422 428 TM |
| Presa de Relaves | |
| Volumen Total | 1 647 282 m ³ |
| Excavación para Cimentación | 119 300 m ³ |
| Material de Préstamo | 294 149 m ³ |
| Importación de Material de Préstamo | 0 m ³ |
| Capacidad de Almacenamiento | 2 194 680 TM |
| Eficiencia de Capacidad (por m ³ de Dique) | 1,32 TM/ m ³ |
| Tiempo de Vida | 3,8 años |
| Distribución de Relave, al Dique | 53,2 % |
| Distribución de Relave, al Estanque | 46,8 % |

Tabla 4.7 Descripción de la Alternativa C para Depósito de Relaves

| | |
|---|--------------------------|
| Dique de Relave | Relave Grueso Cicloneado |
| Talud aguas abajo | 3,00H:1V |
| Talud aguas arriba | 1,5H : 1V |
| Cota base | 4 000 msnm |
| Cota de Corona | 4 032 msnm |
| Altura de Dique | 32 m |
| Ancho Corona | 7 m |
| Longitud de Corona | 696 m |
| Volumen de Dique | 1 048 051 m ³ |
| Peso Unitario Compactado | 2,03 TM/ m ³ |
| Peso Compactado | 2 127 543 TM |
| Estanque del Depósito | Relave Fino Cicloneado |
| Cota base | 4 000 msnm |
| Cota máxima | 4 030 msnm |
| Profundidad del Estanque | 30 m |
| Volumen | 1 669 575 m ³ |
| Peso Unitario | 1,13 TM/ m ³ |
| Peso | 1 886 620 TM |
| Borde libre | 2 m |
| Dique de Arranque | Material de préstamo |
| Cota Base | 4 000 msnm |
| Cota de Corona | 4 012 msnm |
| Altura | 12 m |
| Ancho de Corona | 7 m |
| Talud | 2,0H :1V |
| Volumen | 164 019 m ³ |
| Peso Unitario | 2,10 TM/ m ³ |
| Peso | 344 440 TM |
| Presa de Relaves | |
| Volumen Total | 2 881 645 m ³ |
| Excavación para Cimentación | 176 075 m ³ |
| Material de Préstamo | 434 134 m ³ |
| Importación de Material de Préstamo | 0 m ³ |
| Capacidad de Almacenamiento | 4 018 355 TM |
| Eficiencia de Capacidad (por m ³ de Dique) | 3,75 TM/ m ³ |
| Tiempo de Vida | 6,5 años |
| Distribución de Relave, al Dique | 53,0 % |
| Distribución de Relave, al Estanque | 47,0 % |

Tabla 4.8 Descripción de la Alternativa D para Depósito de Relaves

| Dique de Relave | Material de Préstamo |
|---|-------------------------------------|
| Talud aguas abajo | 3,00H :1V |
| Talud aguas arriba | 1,5H : 1V |
| Cota base | 4 000 msnm |
| Cota de Corona | 4 052 msnm |
| Altura de Dique | 32 m |
| Ancho Corona | 7 m |
| Longitud de Corona | 696 m |
| Volumen de Dique | 1 048 051 m ³ |
| Peso Unitario Compactado | 2,03 TM/ m ³ |
| Peso Compactado | 2 127 543 TM |
| Estanque del Depósito | Relave Total(sin clasificar) |
| Cota base | 4 000 msnm |
| Cota máxima | 4 050 msnm |
| Profundidad del Estanque | 30 m |
| Volumen | 1 669 575 m ³ |
| Peso Unitario | 1,13 TM/ m ³ |
| Peso | 1 886 620 TM |
| Borde libre | 2 m |
| Dique de Arranque | Material de préstamo |
| Cota Base | 4 000 msnm |
| Cota de Corona | 4 012 msnm |
| Altura | 12 m |
| Ancho de Corona | 7 m |
| Talud | 2,0H :1V |
| Volumen | 164 019 m ³ |
| Peso Unitario | 2,10 TM/ m ³ |
| Peso | 344 440 TM |
| Presa de Relaves | |
| Volumen Total | 2 881 645 m ³ |
| Excavación para Cimentación | 176 075 m ³ |
| Material de Préstamo | 1 931 350 m ³ |
| Importación de Material de Préstamo | 1 497 216 m ³ |
| Capacidad de Almacenamiento | 2 086 969 TM |
| Eficiencia de Capacidad (por m ³ de Dique) | 1,95 TM/ m ³ |
| Tiempo de Vida | 3,5 años |
| Distribución de Relave, al Dique | 0 % |
| Distribución de Relave, al Estanque | 100 % |

En base a los resultados reportados en las tablas precedentes y a una evaluación económica se ha elaborado la tabla siguiente:

Tabla 4.9 Parámetros Tecno-económicos de las diferentes alternativas de ubicación de las Presas de Relaves

| Parámetros de Diseño | A | B | C | D |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Alternativa | A | B | C | D |
| Altura Presa, m | 7 | 22 | 32 | 32 |
| Volumen de Presa, m ³ | 575 470 | 1 647 282 | 2 881 645 | 2 881 645 |
| Capacidad del Depósito, TM | 773 942 | 2 194 680 | 4 018 355 | 2 086 969 |
| Eficiencia de Capacidad (TM/m ³ de Dique) | 3,58 | 2,67 | 3,75 | 1,95 |
| Tiempo de Operación, años | 1,2 | 3,8 | 6,5 | 3,5 |
| Área de Impacto Ambiental inmediata, m ² | 128,865 | 146 345 | 181 403 | 850 399 |
| Costo Total Construcción, US\$ | 2 078 273 | 2 892 793 | 3 171 999 | 9 383 969 |
| Costo Unitario, US\$/TM de relave | 2,69 | 1,32 | 0,79 | 4,51 |

De acuerdo a esta evaluación la alternativa **C** es la más aceptable para la construcción de la Presa de Relaves. En el mismo sitio la construcción de un Depósito similar que emplea material de préstamo tiene un costo sumamente elevado, 6 veces mayor, y una vida 2 veces menor. El atributo de este tipo de Presas referido a una mayor estabilidad química, pueden ser resueltos a un costo mucho menor que el involucrado en este tipo de construcciones., como se mostrará mas adelante.

4.2.2 Pruebas de Clasificación de Relaves

Se realizaron varias pruebas de clasificación de relaves con hidrociclones, teniendo como objetivo principal, obtener una mayor distribución de relaves en el underflow, sin variar sus características para la construcción del dique de la presa. Esta distribución del underflow y el overflow (%U y %O) esta

relacionada con el tiempo de vida de la Presa de Relaves. El resumen de las pruebas pueden ser observadas en las tablas 4.10 y 4.11

Tabla 4.10.- Pruebas de Clasificación de Relaves con Hidrociclón de 8"

| PRUEBAS CON HIDROCIKLON DE 8" | | | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|----------------|
| Presión= (1,4 – 1,0) bar = cte | | | |
| Apex (pulg) | %U | %O | % -m200 |
| 1 1/4 | 63,4 | 36,6 | 42 |
| 1 1/16 | 53,1 | 46,9 | 33 |

Tabla 4.11. Pruebas de Clasificación de Relaves con Hidrociclón de 10"

| PRUEBAS CON HIDROCIKLON DE 10" | | | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|----------------|
| Apex 1" = cte | | | |
| Presión (bar) | %U | %O | % -m200 |
| 0,8 | 20,2 | 79,8 | 26 |
| 1,2 | 34,0 | 66,0 | 27 |
| Apex 1 1/4" = cte | | | |
| Presión (bar) | %U | %O | % -m200 |
| 1,5 | 52,0 | 48,0 | 24 |
| 2,0 | 54,3 | 45,7 | 25 |
| Apex 1 9/16" = cte | | | |
| Presión (bar) | %U | %O | % -m200 |
| 1,5 | 46,8 | 53,2 | 25 |
| 2,0 | 54,8 | 45,2 | 26 |

De acuerdo a estas pruebas de clasificación, la mayor recuperación se obtiene con los hidrociclones de 8", 63% de material grueso en el underflow, pero su contenido de fino es mayor, 42% -m200. Las pruebas realizadas con hidrociclón de 10" están mas acorde con lo que se busca y el contenido de finos supera ligeramente a lo establecido por Lara-Barrera, para construcción de diques de Presa de Relaves (<20% de finos).

Se optó por realizar pruebas complementarias con el hidrociclón de 10", apex 1 1/4", durante 24 horas continuas para determinar la variabilidad del

relave en cuanto a los parámetros tales como % de sólidos, granulometría, dilución; tanto en el alimento como en el underflow y overflow. Los resultados se muestran en la tabla 4.12 y en las figuras 4.1 y 4.2.

Como se observa en la figura 4.1 y 4.2, la recuperación promedio en el underflow es de 53% y el contenido de finos en este es de 27.6%. Si bien es cierto el % de finos es ligeramente superior a lo establecido anteriormente, se demostrará que esta Presa de Relaves es físicamente estable.

De acuerdo a estos resultados, se realizaron los cálculos geométricos para optimizar el tiempo de vida de la Presa de Relaves, y su operatividad en el tiempo. Se tuvo en consideración los siguientes parámetros: tamaño del dique de arranque, talud del dique de arranque, talud del dique de la presa, ancho de corona, ubicación del eje de la presa, distribución porcentual del underflow y el overflow.

Tabla 4.12

| CICLON Vortex | D 10 | | | | Apex | | | | Presión | | | | U |
|------------------|----------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|---------|-------------|-------|-------|------|------|
| | 2 ½" | | | | 1 ¼" | | | | 1.2-1.5 bar | | | | |
| | ALIMENTO | | | | U/F | | | | O/F | | | | |
| % +m200 | % -m200 | %S | L/S | % +m200 | % -m200 | %S | L/S | % +m200 | % -m200 | %S | L/S | | |
| 1 | 39,42 | 60,58 | 28,81 | 2,47 | 70,30 | 29,70 | 74,99 | 0,33 | 2,09 | 97,91 | 16,68 | 4,99 | 54,1 |
| 2 | 41,24 | 58,76 | 28,07 | 2,56 | 70,27 | 29,73 | 70,68 | 0,41 | 1,51 | 98,49 | 15,98 | 5,26 | 55,7 |
| 3 | 46,43 | 53,57 | 29,44 | 2,40 | 71,26 | 28,74 | 70,93 | 0,41 | 2,10 | 97,90 | 16,58 | 5,03 | 57,0 |
| 4 | 38,27 | 61,73 | 28,55 | 2,50 | 69,97 | 30,03 | 73,04 | 0,37 | 2,06 | 97,94 | 16,94 | 4,90 | 53,0 |
| 5 | 34,38 | 65,63 | 26,92 | 2,71 | 68,09 | 31,91 | 71,16 | 0,41 | 2,25 | 97,75 | 14,74 | 5,79 | 57,1 |
| 6 | 36,92 | 63,08 | 26,76 | 2,74 | 66,05 | 33,95 | 70,58 | 0,42 | 2,06 | 97,94 | 16,47 | 5,07 | 50,2 |
| 7 | 33,33 | 66,67 | 27,29 | 2,66 | 67,87 | 32,13 | 71,40 | 0,40 | 2,65 | 97,35 | 16,72 | 4,98 | 50,6 |
| 8 | 39,73 | 60,27 | 27,04 | 2,70 | 68,61 | 31,39 | 70,48 | 0,42 | 1,73 | 98,27 | 16,38 | 5,11 | 51,4 |
| 9 | 40,54 | 59,46 | 27,07 | 2,69 | 70,03 | 29,97 | 73,41 | 0,36 | 1,91 | 98,09 | 16,45 | 5,08 | 50,6 |
| 10 | 38,89 | 61,11 | 27,89 | 2,59 | 70,57 | 29,43 | 71,32 | 0,40 | 1,66 | 98,34 | 16,72 | 4,98 | 52,3 |
| 11 | 37,04 | 62,96 | 27,12 | 2,69 | 70,75 | 29,25 | 72,23 | 0,38 | 2,53 | 97,47 | 14,13 | 6,08 | 59,6 |
| 12 | 35,85 | 64,15 | 27,47 | 2,64 | 72,95 | 27,05 | 79,20 | 0,26 | 1,42 | 98,58 | 16,65 | 5,01 | 49,9 |
| 13 | 35,53 | 64,47 | 26,46 | 2,78 | 75,33 | 24,67 | 71,86 | 0,39 | 1,41 | 98,59 | 15,27 | 5,55 | 53,7 |
| 14 | 38,57 | 61,43 | 27,22 | 2,67 | 73,21 | 26,79 | 78,56 | 0,27 | 1,60 | 98,40 | 15,51 | 5,45 | 53,6 |
| 15 | 34,78 | 65,22 | 25,95 | 2,85 | 73,42 | 26,58 | 74,40 | 0,34 | 1,47 | 98,53 | 15,43 | 5,48 | 51,1 |
| 16 | 40,85 | 59,15 | 25,86 | 2,87 | 73,05 | 26,95 | 72,60 | 0,38 | 1,62 | 98,38 | 15,13 | 5,61 | 52,4 |
| 17 | 34,41 | 65,59 | 26,93 | 2,71 | 74,45 | 25,55 | 78,50 | 0,27 | 1,41 | 98,59 | 15,99 | 5,25 | 51,0 |
| 18 | 34,44 | 65,56 | 27,67 | 2,61 | 74,87 | 25,13 | 72,39 | 0,38 | 2,41 | 97,59 | 16,90 | 4,92 | 50,8 |
| 19 | 40,51 | 59,49 | 28,49 | 2,51 | 74,91 | 25,09 | 75,10 | 0,33 | 1,59 | 98,41 | 17,35 | 4,76 | 50,9 |
| 20 | 33,98 | 66,02 | 25,65 | 2,90 | 75,47 | 24,53 | 74,00 | 0,35 | 1,15 | 98,85 | 15,86 | 5,31 | 48,6 |
| 21 | 37,78 | 62,22 | 26,98 | 2,71 | 75,07 | 24,93 | 74,74 | 0,34 | 1,54 | 98,46 | 15,89 | 5,29 | 52,2 |
| 22 | 40,00 | 60,00 | 28,80 | 2,47 | 76,24 | 23,76 | 72,15 | 0,39 | 2,63 | 97,37 | 17,23 | 4,80 | 52,8 |
| 23 | 49,02 | 50,98 | 26,92 | 2,71 | 75,18 | 24,82 | 73,20 | 0,37 | 2,56 | 97,44 | 17,11 | 4,84 | 47,6 |
| 24 | 36,30 | 63,70 | 34,84 | 1,87 | 78,27 | 21,73 | 72,55 | 0,38 | 1,54 | 98,46 | 16,91 | 4,91 | 67,1 |

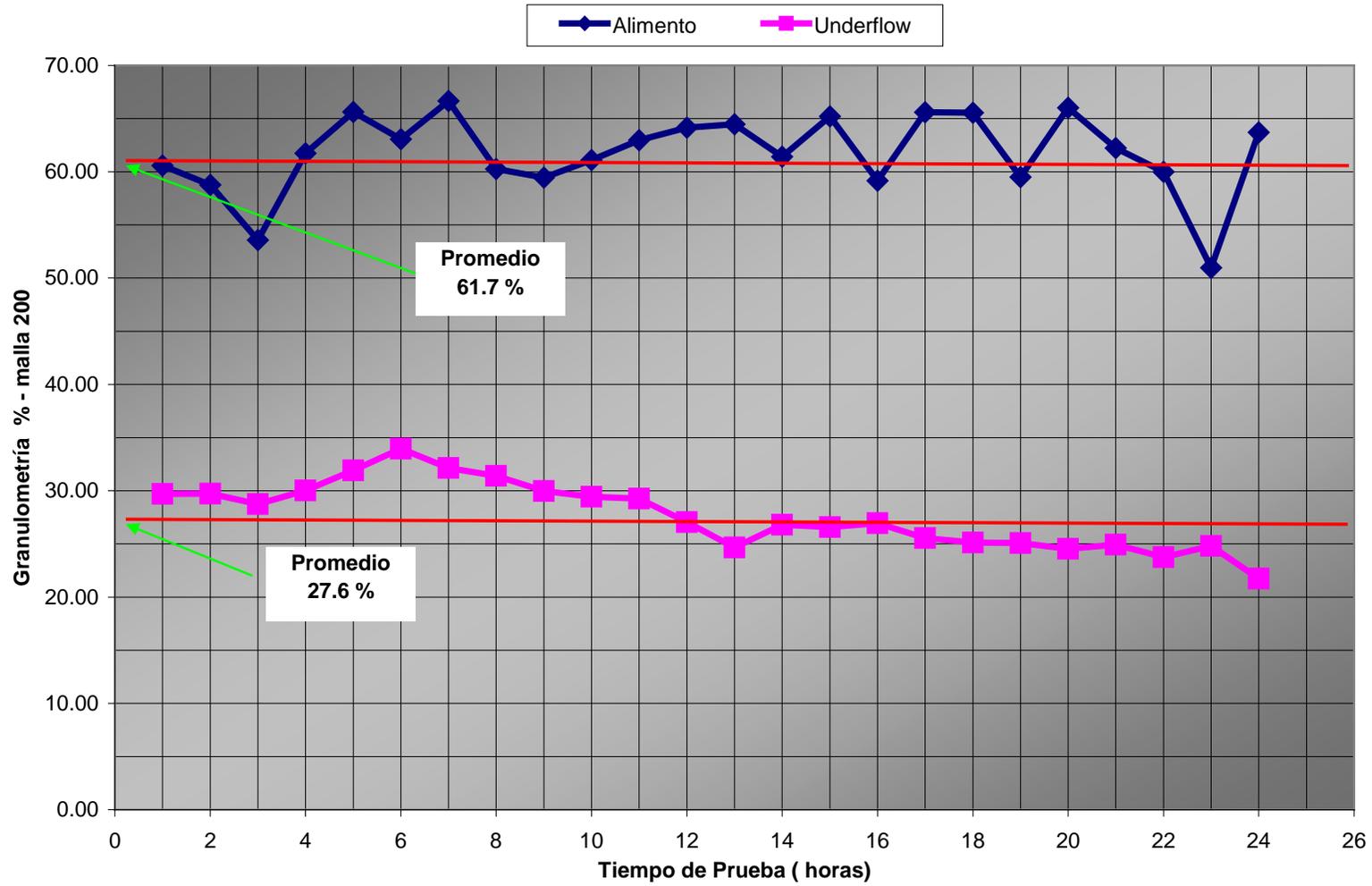


Figura 4.1.-Granulometría del Relave de la Planta (2001)

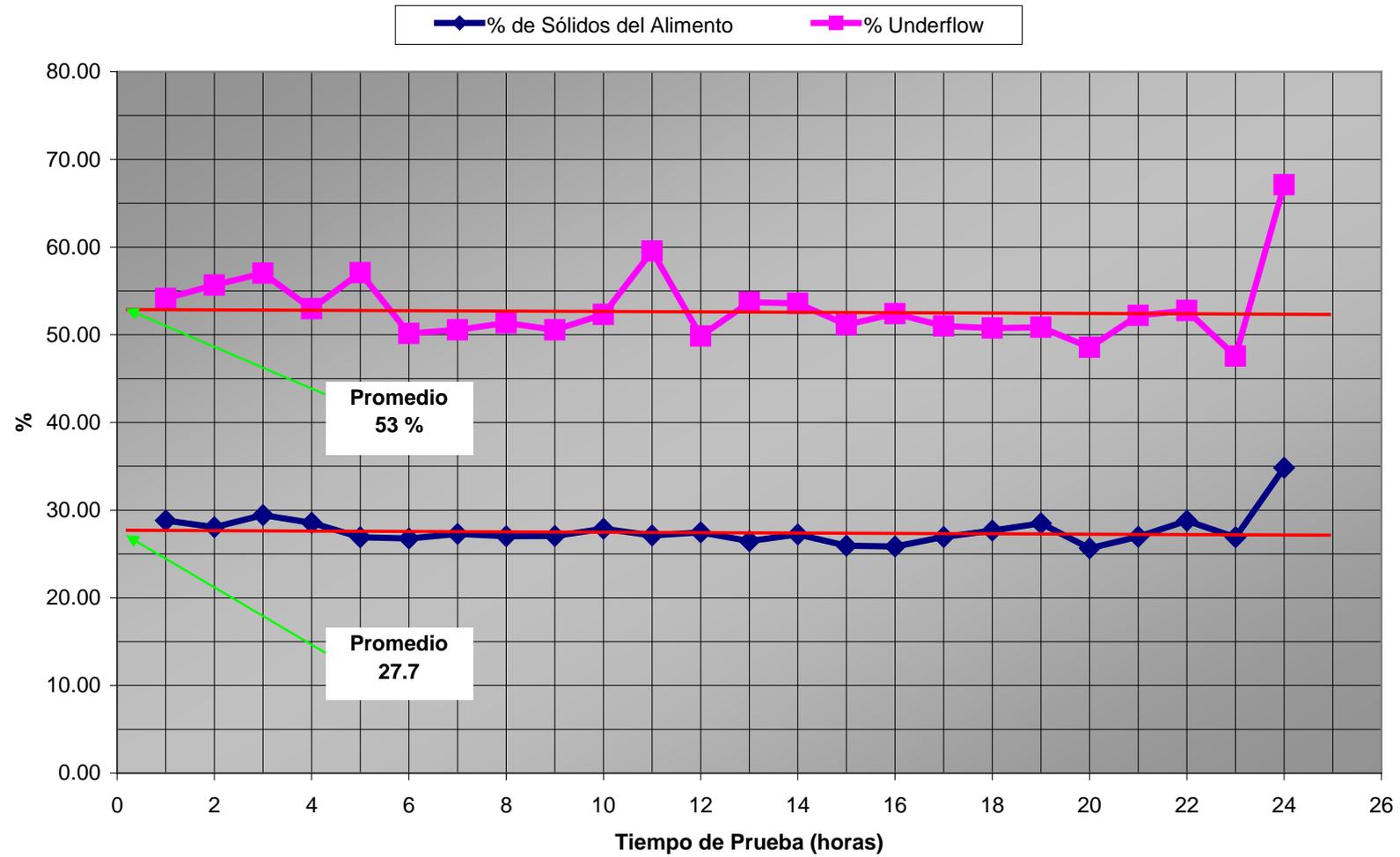


Figura 4.2.- % de Recuperación en el Underflow con la Variación del % de Sólidos

4.2.3 Análisis de Capacidad y Crecimiento de la Presa de Relaves.

Con los datos obtenidos se procede a realizar un análisis del tiempo de vida de la Presa de Relaves y su respectiva operatividad en el tiempo. Los parámetros que se toman en cuenta son los siguientes: talud aguas abajo de la Presa de Relaves, tamaño y talud del dique de arranque, ubicación del eje principal de la Presa de Relaves, talud del área donde se emplazará el depósito, la distribución del underflow en el dique de la Presa de Relaves. El análisis dio como resultado óptimo la siguiente Presa de Relaves. Ver tabla 4.13.

Se realizó una serie de cálculos para determinar la operatividad de la Presa de Relaves en el tiempo. Esto quiere decir que en todo momento la cota del dique debe ser siempre mayor a la cota de la poza de finos. En este caso se considera una diferencia de 2 metros, para prevenir cualquier tipo de rebalse. Ver tabla 4.14 y figura 4.3

Se observa que durante toda la etapa de operación de la Presa de Relaves el crecimiento del Dique de la Presa es superior al nivel de crecimiento de la poza de finos. Esto garantiza la operatividad de la Presa de Relaves durante todo su tiempo de Vida.

Tabla 4.13

| DATOS DE DISEÑO DE LA PRESA DE RELAVES PROYECTADO | | | |
|---|-----------|--------------------------|------------------|
| Excavación y Relleno para Conformar la Cimentación | | Dique de Arranque | |
| | | Cota Base | 4 000 Msnm |
| | | Cota de Corona | 4 012 Msnm |
| | | Altura | 12 M |
| | m^3 | Corona | 7 M |
| Excavación | 176075 | Talud | 2,0 : 1,0 H : V |
| Relleno | 176075 | Volumen | 164 019 m^3 |
| | | Peso Unitario | 2,2 TM/ m^3 |
| | | Peso | 360 841 TM |
| Movimiento de Tierra del Lugar del Emplazamiento | | | |
| Talud de Corte | H:V | | 2,0:1 |
| Volumen Total | m^3 | | 111 528 |
| Volumen Útil (40%) | m^3 | | 44 611 |
| Volumen Estéril (60%) | m^3 | | 66 917 |
| Volumen de Tierra Requerido | | | |
| Cimentación (relleno) | | | 176 075 |
| Dique de Arranque | | | 164 018,7 |
| Total | | | 340 094 |
| Balance de Volúmenes | | | |
| Material de Préstamo | m^3 | | 295 483 |
| Material de Desecho | m^3 | | 242 992 |
| Dique de Relave | | | |
| Talud Aguas Abajo | H : V | | 3,0:1 |
| Talud Aguas Arriba | H : V | | 1,5:1 |
| Cota Base | Msnm | | 4 000 |
| Cota de Corona | Msnm | | 4 032 |
| Altura | M | | 32 |
| Volumen | m^3 | | 1 019 633 |
| Peso Unitario | TM/ m^3 | | 1,74 |
| Peso | TM | | 1 774 162 |
| P.U.Compactado | TM/ m^3 | | 2,034 |
| Peso Compactado | TM | | 2 073 934 |
| Estanque del Depósito | | | |
| Cota Base | Msnm | | 4 000 |
| Cota de Corona | Msnm | | 4 030 |
| Altura | M | | 30 |
| Volumen | m^3 | | 1 627 566 |
| Peso Unitario | TM/ m^3 | | 1,13 |
| Peso | TM | | 1 839 150 |
| Borde Libre | M | | 2 |
| Distribución | | | |
| Dique | | | 53,0 |
| Estanque | | | 47,0 |
| Total | | | 100,0 |
| Tiempo de Vida | Años | | 6,30 |

Tabla 4.14

| | | | | |
|-----|--------------|----------|------|-------|
| | % | Peso | | |
| | Distribución | Unitario | | |
| U/F | 53 | 2,034 | TMSD | 1 703 |
| O/F | 47 | 1,13 | | |

| Tiempo Años | Cota | | Tonelaje Acum(+) | | | Estanque | | Dique | | Total M3 |
|----------------|------------------|---------------|------------------|-------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|------------------|
| | Estanque msnm | Dique msnm | Estanque Tm | Dique Tm | Total Tm | Vol Parcial | Vol Ac(+) m3 | Vol Parcial | Vol Ac(+) m3 | |
| 0,00 | 4 000,00 | 4 012 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,22 | 4 002,00 | 4 012 | 63 336 | 71 422 | 134 758 | 56 050 | 56 050 | 35 114 | 35 114 | 91 164 |
| 0,47 | 4 004,00 | 4 012 | 138 235 | 155 882 | 294 117 | 66 282 | 122 332 | 41 524 | 76 638 | 198 970 |
| 0,54 | 4 004,31 | 4 012 | 157 045 | 177 093 | 334 138 | 16 646 | 138 978 | 10 428 | 87 066 | 226 044 |
| 0,75 | 4 005,69 | 4 016 | 218 396 | 246 277 | 464 673 | 54 293 | 193 271 | 34 014 | 121 080 | 314 351 |
| 0,75 | 4 006,00 | 4 016 | 220 252 | 248 370 | 468 622 | 1 643 | 194 914 | 1 029 | 122 109 | 317 022 |
| 1,07 | 4 008,00 | 4 016 | 311 328 | 351 072 | 662 400 | 80 598 | 275 511 | 50 493 | 172 602 | 448 113 |
| 1,41 | 4 010,00 | 4 016 | 411 648 | 464 199 | 875 848 | 88 779 | 364 291 | 55 618 | 228 220 | 592 511 |
| 1,42 | 4 009,89 | 4 016 | 414 309 | 467 199 | 881 508 | 2 354 | 366 645 | 1 475 | 229 695 | 596 340 |
| 1,64 | 4 011,00 | 4 020 | 478 582 | 539 677 | 1 018 259 | 56 879 | 423 524 | 35 633 | 265 328 | 688 852 |
| 1,79 | 4 012,00 | 4 020 | 521 743 | 588 348 | 1 110 091 | 38 195 | 461 719 | 23 929 | 289 257 | 750 976 |
| 2,12 | 4 014,00 | 4 020 | 619 350 | 698 416 | 1 317 767 | 86 379 | 548 098 | 54 114 | 343 371 | 891 469 |
| 2,50 | 4 016,00 | 4 020 | 730 940 | 824 252 | 1 555 192 | 98 752 | 646 850 | 61 866 | 405 237 | 1 052 086 |
| 2,52 | 4 016,00 | 4 020 | 734 825 | 828 632 | 1 563 458 | 3 438 | 650 288 | 2 154 | 407 391 | 1 057 678 |
| 2,75 | 4 017,13 | 4 024 | 802 019 | 904 405 | 1 706 424 | 59 464 | 709 752 | 37 253 | 444 644 | 1 154 395 |
| 2,92 | 4 018,00 | 4 024 | 854 065 | 963 095 | 1 817 160 | 46 058 | 755 810 | 28 855 | 473 498 | 1 229 308 |
| 3,38 | 4 020,00 | 4 024 | 988 138 | 1 114 283 | 2 102 421 | 118 648 | 874 458 | 74 330 | 547 828 | 1 422 287 |
| 3,81 | 4 021,94 | 4 024 | 1 113 090 | 1 255 187 | 2 368 277 | 110 577 | 985 036 | 69 274 | 617 103 | 1 602 138 |
| 3,88 | 4 022,00 | 4 024 | 1 133 362 | 1 278 047 | 2 411 409 | 17 940 | 1 002 975 | 11 239 | 628 342 | 1 631 317 |
| 4,04 | 4 022,86 | 4 028 | 1 180 493 | 1 331 195 | 2 511 688 | 41 709 | 1 044 684 | 26 130 | 654 471 | 1 699 156 |
| 4,42 | 4 024,00 | 4 028 | 1 290 733 | 1 455 507 | 2 746 240 | 97 557 | 1 142 241 | 61 117 | 715 588 | 1 857 830 |
| 5,00 | 4 026,00 | 4 028 | 1 460 950 | 1 647 454 | 3 108 404 | 150 635 | 1 292 876 | 94 369 | 809 958 | 2 102 834 |
| 5,28 | 4 026,50 | 4 028 | 1 542 550 | 1 739 471 | 3 282 022 | 72 213 | 1 365 089 | 45 240 | 855 197 | 2 220 286 |
| 5,52 | 4 027,78 | 4 032 | 1 613 235 | 1 819 180 | 3 432 414 | 62 553 | 1 427 641 | 39 188 | 894 385 | 2 322 027 |
| 5,63 | 4 028,00 | 4 032 | 1 643 967 | 1 853 835 | 3 497 802 | 27 197 | 1 454 838 | 17 038 | 911 423 | 2 366 262 |
| 6,30 | 4 030,00 | 4 032 | 1 839 150 | 2 073 935 | 3 913 084 | 172 728 | 1 627 566 | 108 210 | 1 019 634 | 2 647 200 |

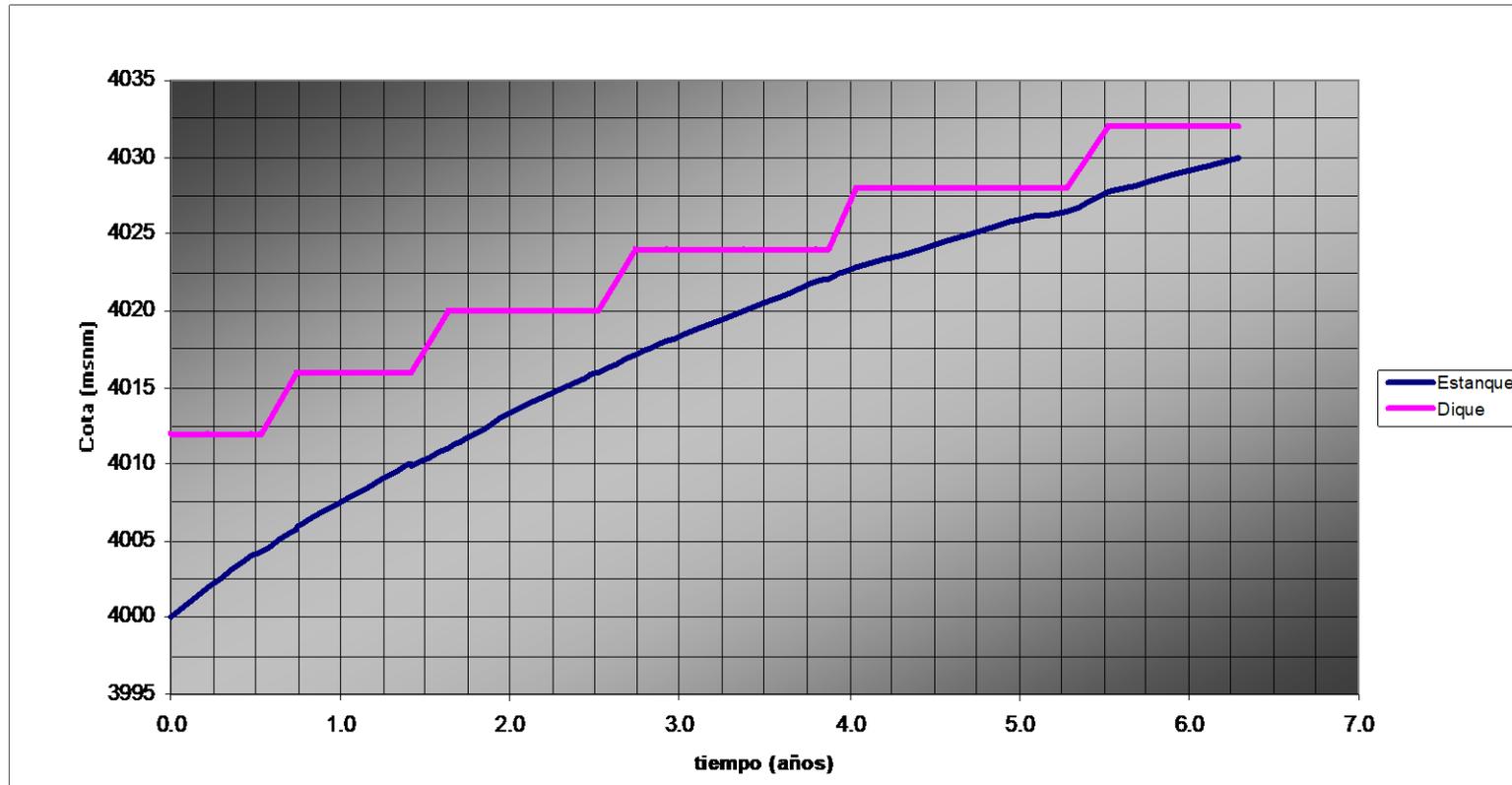


Figura 4.3.- Crecimiento relativo de la superficie del Estanque y de la corona del Dique.

4.2.4. Sistema de Transporte y Emplazamiento de Relaves Grueso y

Fino.

La Presa estará conformada por un Dique de Arranque de 12 m de altura sobre el cual se emplazará relave grueso clasificado (Underflow o U/F) hasta alcanzar 4032 m.s.n.m (32 metros de altura). La Presa será del tipo de Línea Central, y el Dique de Arranque será construido con tierra compactada. El talud aguas abajo de la presa será 3,0 H : 1,0 V, y el de aguas arriba será 1,5 H : 1,0 V. Se ha proyectado que el nivel máximo de almacenamiento de relave fino será en la cota 4 030 m.s.n.m. dejando un borde libre de 2,0 metros. Se ha determinado también que durante la vida operativa del Depósito el borde libre se mantendrá por encima del valor mencionado.

Se ha determinado que es posible construir el dique compactando relave grueso en terrazas horizontales escalonadas de 3,5 metros de ancho; la alta recuperación de arenas en el U/F y la geometría favorable en el fondo del depósito permiten reducir el riesgo de desbordamiento de relave fino. En vista que se realizará la compactación de relave grueso, se ha considerado ubicar el circuito de clasificación en el talud aguas abajo del lado este de la Presa de Relaves Antigua (la cual se encuentra al lado de la Presa de Relaves Proyectado). Si bien en algunas operaciones se ha compactado el relave aplicando la presión sobre superficies inclinadas (a veces con taludes mas empinados que 4,0H: 1,0V), se ha adoptado la práctica de aplicar la presión **únicamente** sobre superficies horizontales. Consecuentemente el relave tendrá que ser emplazado de tal modo de conformar terrazas horizontales progresivas con espesores en el orden de 30 cm.

Otra característica importante del diseño es que, a diferencia de la operación actual que emplea un ciclón de 20" Ø, se empleará un nido de 4 ciclones de 10" Ø, que deben operar en una sola posición para garantizar una operación de cuya eficiencia depende la calidad y disponibilidad del material para construir el Dique.

Transporte por tubería del relave total y Clasificación al pie de la Presa.

La totalidad del relave en pulpa se impulsará, desde la Planta Concentradora, mediante bombas de lodos y se transportará por una tubería presurizada hasta el pie de la Presa Proyectada, donde mediante otra bomba se impulsa la pulpa para operar el nido de hidrociclones, ubicados en una torre fija a una altura de 5 m sobre el nivel de la cresta del dique de la presa. El U/F sería descargado directamente sobre el piso conformando una Pila de relave grueso con aproximadamente 18% humedad.

Un Cargador Frontal, cargará entonces el U/F a un camión de 10 m³ de capacidad para emplazar el relave formando las plataformas de la Presa. Como la estación de ciclones estará elevado mas de 5 m sobre el nivel de la cresta del Dique la pulpa del O/F sería descargado por gravedad a través de una tubería de 8" Ø, a lo largo de la cresta del Dique que se eleva progresivamente; en la cresta del Dique y a lo largo de todo el perímetro se instalará una tubería con 12 grifos espaciados uniformemente para descargar el O/F en la poza de finos. Ver figura 4.4 y 4.5.

Emplazamiento del Relave Grueso o del U/F en el Dique de la Presa.

El U/F que se descarga al pie del dique se carga a los camiones y se trasladan formando las plataformas del dique de la presa. Esta alternativa tiene las siguientes ventajas comparativas:

- El U/F se puede distribuir uniformemente, en cantidad, granulometría y humedad, en todas las terrazas independientemente de su ubicación respecto al nido de hidrociclones.
- La posición fija del nido de hidrociclones permite una operación muy eficiente porque no hay variación de la presión por la variación de longitud y altura conforme avance la construcción.
- El transporte y emplazamiento de U/F a las diversas terrazas no obstruye el trabajo de compactación en la cresta y terrazas inferiores.
- No requiere mano de obra para cambiar la posición de hidrociclones y/o tuberías de descarga y alimentación de relaves.
- El nido de hidrociclones opera ininterrumpidamente porque no hay cambio de posiciones; aún en el caso de lluvias muy intensas, el U/F puede almacenarse al pie del nido de hidrociclones para reanudar la operación de conformado de plataformas cuando pase el inconveniente.
- Gracias al fácil desplazamiento y bajo costo de transporte en camiones, el U/F puede ser ubicado en lugares apropiados para reducir el trabajo que debe realizar el tractor para distribuir el relave en capas de 0.30 m

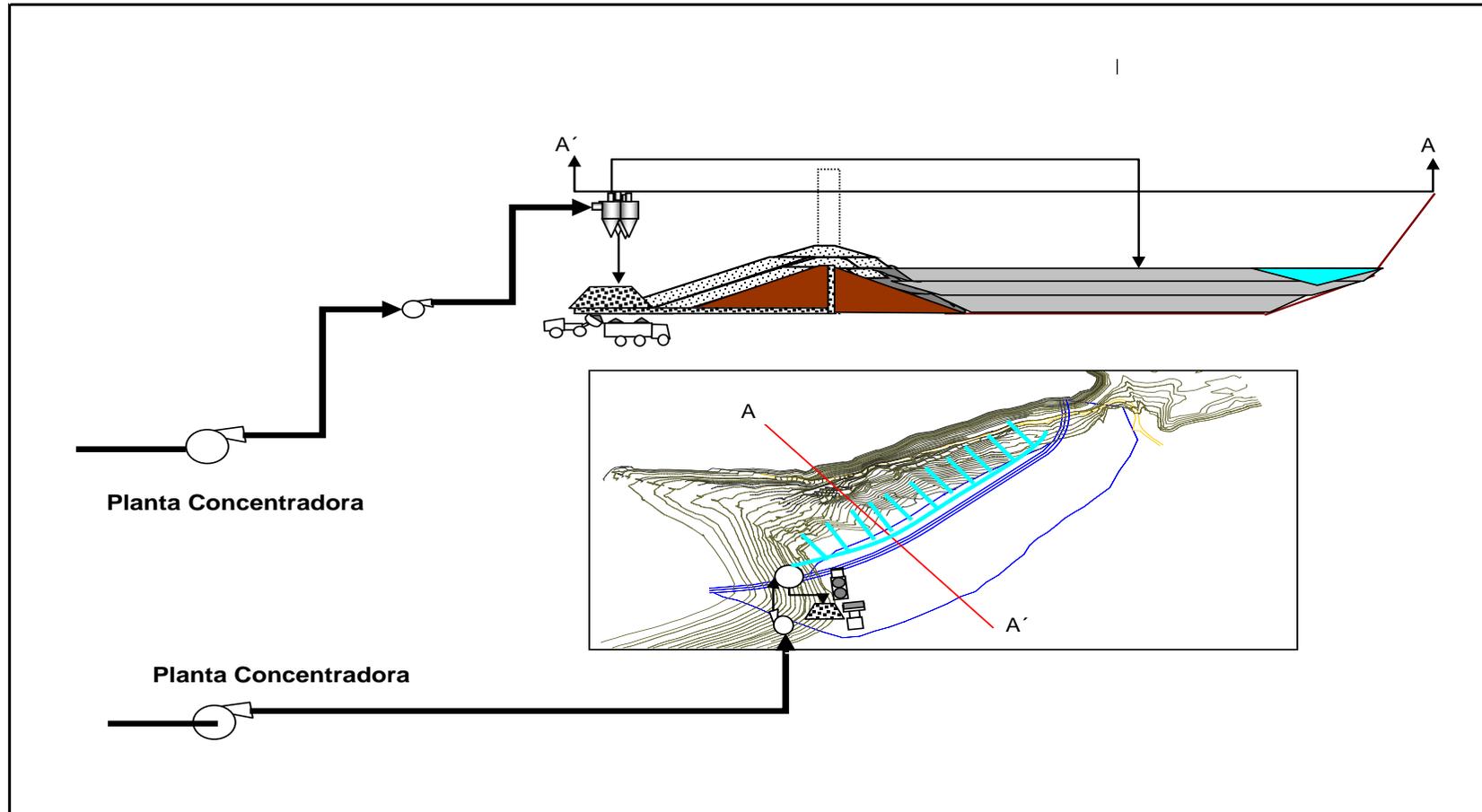


Figura 4.4.- Sistema Convencional de transporte por tubería del relave total

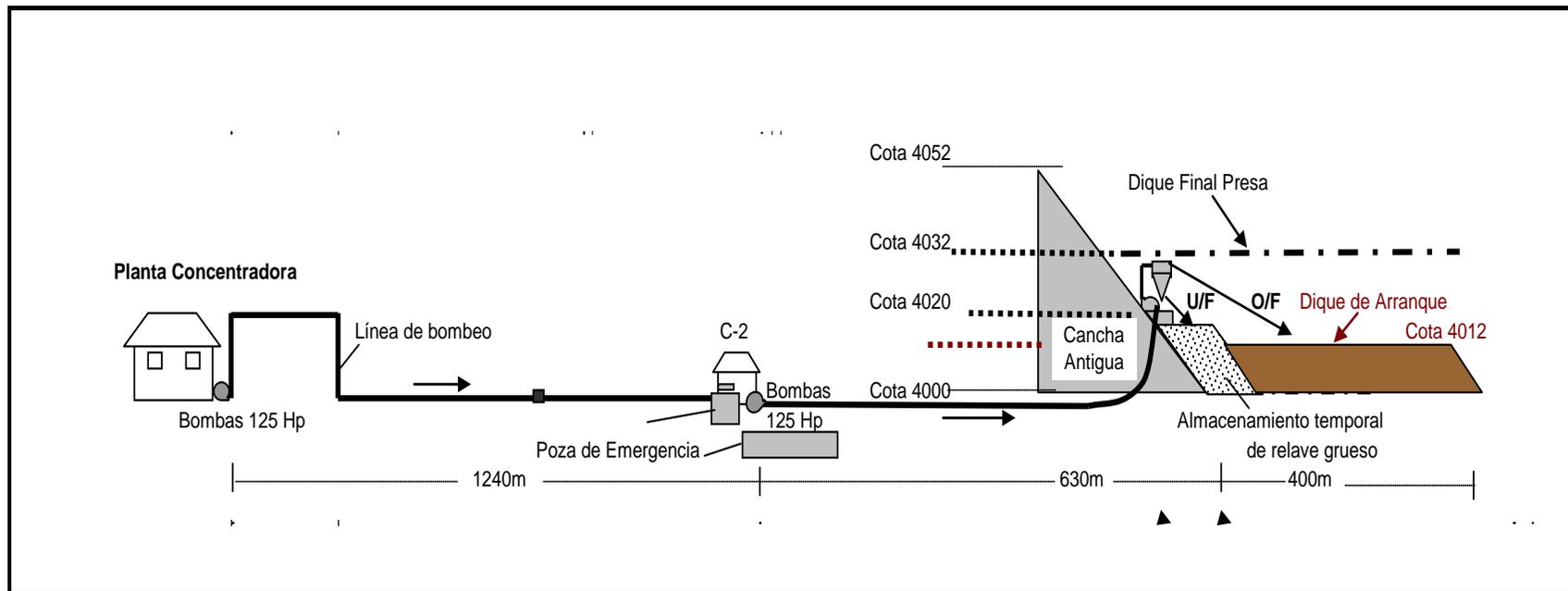


Figura 4.5.- Sistema de transporte y Clasificación de Relaves para la Presa Proyectada

4.2.5 Sistema de Descarga de Agua Decantada.

Tradicionalmente los diseñadores de Depósitos de Relaves han optado por evacuar el agua de la zona de decantación mediante sistemas de conducción por gravedad que atraviesan el Dique del Depósito; si bien este es un sistema que ahorra energía de bombeo y requiere poca supervisión, no cumple con las recomendaciones especificadas por expertos (Vick, 1990) y por la propia Guía de Manejo de Relaves preparada por S. Vick y C. Villachica para el Ministerio de Energía y Minas.

Un sistema de decantación de este tipo, dígase Quenas o Torre de Decantación, requiere de una estructura competente y compleja de concreto que presenta riesgos de falla debido a la incompatibilidad de textura con el material del dique y a su rigidez relativa; estos riesgos son mayores en caso de eventos sísmicos frecuentes en el ambiente peruano.

En el caso de Torres de Decantación con canal de fondo construido en concreto armado, no se han reportado las fallas anteriores; no obstante es común el problema del desplazamiento del espejo de agua mas allá del alcance de las ventanas de la Torre de Decantación, ocasionado por la falta de la supervisión que se supone no requiere. En estas circunstancias la posición fija de la Torre ocasiona por un lado la descarga de lodos y el crecimiento exagerado del espejo de agua; ambos factores ponen en riesgo la estabilidad del Depósito.

Por otro lado, el sistema de evacuación de agua decantada mediante una plataforma flotante con una bomba costará menos que las edificaciones mencionadas anteriormente.

Un sistema de este tipo no solo es menos costoso, también es más flexible frente al movimiento del espejo de agua y no pone en riesgo la estabilidad del Dique. En consecuencia este sistema fue seleccionado para el diseño de la Presa de Relaves.

4.2.6 Estabilidad Física de la Presa de Relaves.

El parámetro que nos asegura que esta Presa de Relaves será físicamente estable es el **factor de seguridad**; evaluado tanto para condiciones estáticas como pseudos estáticas ¹⁰. Los factores de seguridad están asociados al ángulo de fricción interna de la fracción gruesa del relave y, éste último parámetro está asociado al porcentaje de compactación de dicho material. Para esta Presa de Relaves los valores del factor de seguridad superan a los valores mínimos establecidos, lo cual asegura la estabilidad física de la Presa de Relaves. Ver tabla 4.15

Tabla 4.15.-Resumen de Factores de Seguridad
Presa de Relaves Proyectado

| TIPO DE ANALISIS | Estático | Pseudo estático |
|-------------------------------------|-------------|-----------------|
| Presa de Relaves Sección Típica | 2,51 | 1,66 |
| Dique de Arranque Sección Típica | 3,08 | 2,15 |
| F.S. Mínimo | 1,40 | 1,00 |

4.2.7 Estabilidad Química de la Presa de Relaves.

La estabilidad química de la Presa de Relaves durante la operación esta asegurada, ya que de acuerdo al método de construcción, Línea Central, siempre se tendrá relave fresco en la superficie del dique y esto no generará

aguas ácidas. A pesar de que el underflow, quien conforma el dique tiene potencial para generar aguas ácidas ¹¹. Ver tabla 4.16

Tabla 4.16.-Características del material a ser emplazado en Presa de Relaves
Distribución del Azufre en el ciclón D-10

| Tipo de Relave | % S _s | AP | NP | NNP | NP/AP |
|---|------------------|-----|----|---------------|-------------|
| Alimento | 5,40 | 169 | 53 | -116 | 0,31 |
| Underflow | 6,26 | 196 | 32 | -164 | 0,16 |
| Overflow | 4,44 | 139 | 54 | -85 | 0,39 |
| <i>Para garantizar que no habrá drenaje ácido debe ser mayor que:</i> | | | | + 20,0 | 3,00 |

En la etapa de cierre se dispone a hacer lo siguiente: en el último año de operación de la Presa de Relaves se emplazará relave neutro (NNP>20) en la superficie del dique de espesor aproximadamente 1 metro, el cual garantizará que no se genere aguas ácidas.

El relave neutro se obtendrá mediante una planta de flotación, la cual será instalada en el último año de operación de la Presa de Relaves. Esta planta de flotación será utilizada para flotar la pirita, el cual es la principal generadora de aguas ácidas, que se encuentra en el underflow que va a conformar el dique de la Presa de Relaves, y generará un relave con una mínima cantidad de pirita (NNP>57), la cual será emplazado en el dique de la Presa de Relaves durante el último año, esto garantizará la superficie del dique no genere aguas ácidas. La pirita flotada será llevada y vertida a la poza de finos, puntualmente en el espejo de agua, la cual por densidad se depositará en el fondo de la poza de finos, quedando de esta manera

encapsulada y no generará aguas ácidas en la superficie de la poza de finos.

Ver tabla 4.17.

Adicional a este tratamiento procederá a cubrir la Presa de Relaves con una pequeña capa de tierra de cultivo. Esto garantizará la estabilidad química de la Presa de Relaves en el tiempo.

Tabla 4.17 Distribución del Azufre en los Productos de Flotación

| Tipo de Relave | % S _s | AP | NP | NNP | NP/AP |
|---|------------------|-----|-----|---------------|-------------|
| Cabeza | 6,26 | 196 | 80 | -116 | 0,41 |
| Concentrado | 22,89 | 715 | 12 | -703 | 0,02 |
| Relave | 1,40 | 44 | 101 | +57 | 2,30 |
| <i>Para garantizar que no habrá drenaje ácido debe ser mayor que:</i> | | | | + 20,0 | 3,00 |

4.2.8 Cierre de la Presa de Relaves.

En la Etapa de Pre-Cierre ¹², la cual se iniciará un año antes del cierre definitivo de la Presa de Relaves, se construirá una pequeña Planta de Flotación (ver figura 4.6) para separar la pirita del relave. El proceso se describe a continuación:

El relave proveniente de la Planta Concentradora es tratado en un nido de 04 hidrociclones D-10. El O/F es transportado por bombeo la Estanque de la Presa, utilizando la línea actual de relave y el U/F será diluido con agua recirculada hasta alcanzar 43 % de sólidos. Se alimentará a la Planta de Flotación todo el U/F que va ha ser emplazado en el Dique de la Presa de Relaves, este producirá un concentrado de pirita generador de aguas acidas y un relave neutro (ver tabla 4.17). El concentrado será clasificado con un ciclón de 4" (modelo D4BB12), el O/F será recirculado a la entrada del

acondicionador. El U/F será apilado descargándose directamente del ciclón y transportado con volquete a la Presa de Relaves y será depositado en la zona del espejo de agua del depósito, este concentrado por tener mayor densidad se emplazará en los estratos profundos del estanque y el material menos denso se emplazará sobre el concentrado. Consecuentemente la pirita quedará encapsulada y en este estado no generará drenaje ácido.¹³

El relave de la flotación será clasificado con un ciclón de D-10 (modelo Krebs), el O/F será recirculado a la entrada del acondicionador. El U/F será tratado de la misma manera como se ha estado tratando U/F del relave original. Consecuentemente el U/F emplazado en el dique en esta etapa de pre-cierre tendrá un metro de espesor, encapsulando así el material generador de drenaje ácido. Una de las ventajas de esta Planta de Flotación es que no necesita agua para su tratamiento ya que el agua recirculada proveniente de los O/F de los ciclones es suficiente para mantener el proceso en equilibrio. Con este proceso podremos asegurar la estabilidad química del dique ya que el material emplazado en esta etapa no generará drenaje ácido. Asimismo el material fino emplazado en la parte superior del estanque habrá disminuido su potencial de generar ácido. En el cierre definitivo del Depósito de Relaves, este será encapsulado con una cubierta simple de tierra de cultivo en toda su extensión y se cultivarán algunas especies vegetales acordes con la región.

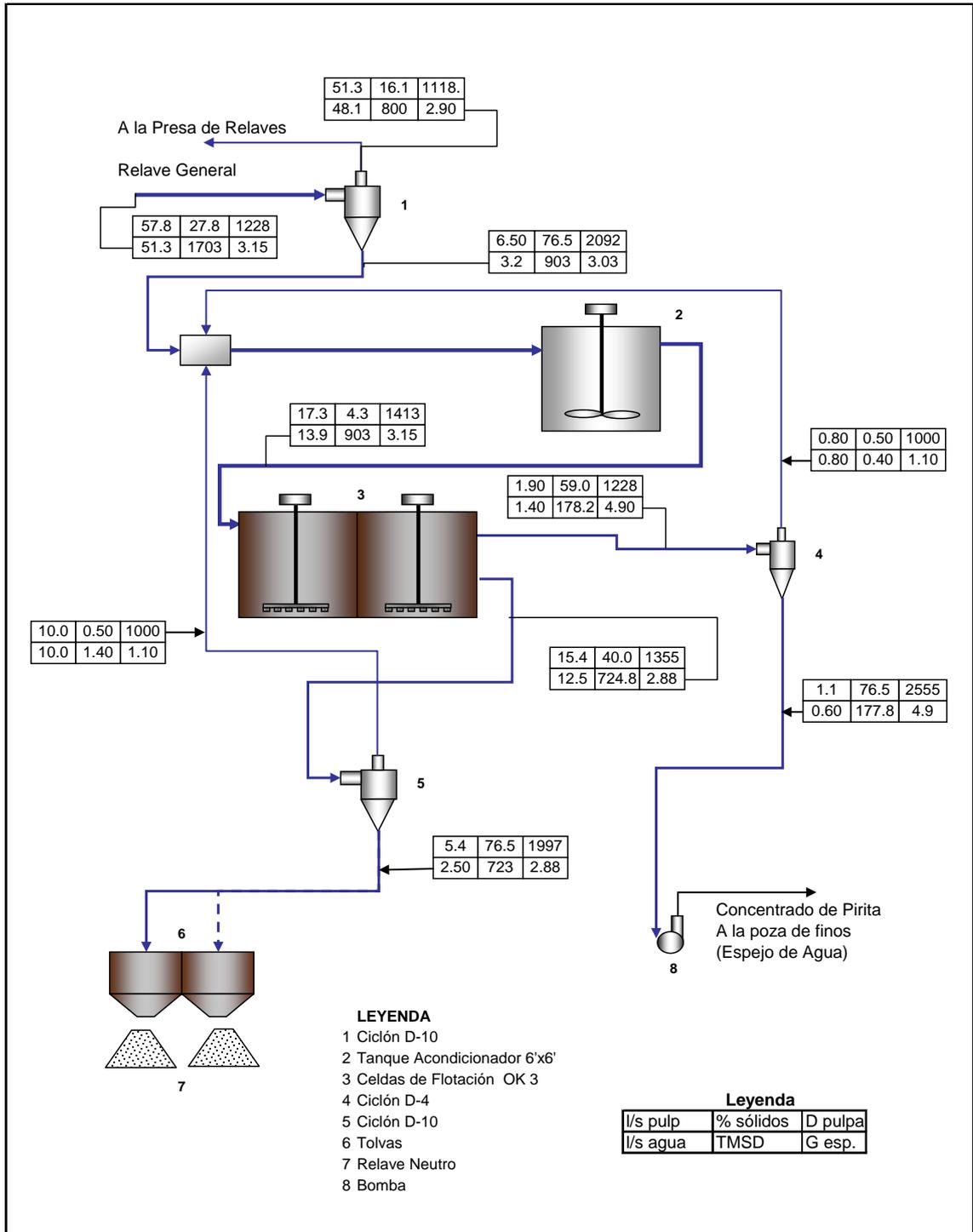


Figura 4.6.- Flow Sheet de la Planta de Flotación de la Pirita

4.2.9 Costo de la tecnología aplicada en el cierre de la Presa de Relaves.

Es indiscutible que el encapsulamiento de Presas de Relaves es costoso, y por lo general se requiere de un buen lapso de tiempo después del cierre para encapsularlo. Además el desembolso de dinero es inmediato.

La Tecnología utilizada en esta Presa de Relaves para su encapsulamiento nos proporciona las siguientes ventajas:

- Es más económico que cualquier otro método(ver tabla 4.18)
- La inversión total se distribuye a lo largo de un año aproximadamente
- Reduce notablemente el tiempo para ejecutar el cierre.
- El cierre se inicia 1 año antes de completar la capacidad de la Presa.
- Garantiza la Estabilidad Química de la Presa.
- No genera impacto ambiental durante la etapa de pre-cierre y cierre.
- La operación de cierre está controlada constantemente.

Esta tecnología es rentable si se planifica desde el inicio de las operaciones y se realiza desde la etapa de pre-cierre.

Tabla 4.18 Costo comparativo de las diferentes técnicas en el Cierre de la Presa de Relaves

| | | Encap de Pirita | Bactericida Recub.Simp | Recub. Complejo | Recub. Membrana |
|--|----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| Costo de la Planta de Flotacion | \$ | 0,04607 | 0 | 0 | 0 |
| Costos de Operación | \$ | 0,05980 | 0 | 0 | 0 |
| Costo Uso de Bactericida | \$ | 0 | 0,624 | 0 | 0 |
| Costo de Recubrimiento Simple | \$ | 0,480 | 0,480 | 0 | 0 |
| Costo de Recubrimiento Complejo | \$ | 0 | 0 | 1,919 | 0 |
| Costo Geomembrana | \$ | 0 | 0 | 0 | 3,12 |
| Costo Total del Encapsulamiento | mill \$ | 0,59 | 1,10 | 1,92 | 3,12 |

CAPITULO V

5.0 CONCLUSIONES

Para mantener la continuidad de las operaciones mineras es imprescindible contar con un depósito de relaves de Flotación que cumpla con las regulaciones ambientales y de seguridad vigentes. Por tal motivo se ha diseñado un Depósito de Relaves que integra conceptos modernos de ingeniería para garantizar la estabilidad física y química en el corto, mediano y largo plazo. Esto garantiza una armonía con el medio ambiente en el tiempo.

A continuación se mencionan las conclusiones más relevantes del manejo de relaves expuestos en este estudio:

- Para la selección de la ubicación del nuevo depósito se realizó previamente un Análisis de Alternativas, que consideró tres lugares alternativos y dos alternativas de material de construcción (Presa de Relaves y Presa de Tierra). El proceso de selección ha sido exhaustivo y ha considerado los factores ambientales como factores de primer orden. Como consecuencia se determinó que la ubicación más conveniente para el Depósito de Relaves de Flotación es la alternativa C y que el diseño

mas adecuado es el que emplea el relave grueso para el recrecimiento del Dique de Contención.

- El método de construcción seleccionado es el de Línea Central, y se iniciará con un Dique de Arranque de 12 m de alto que será construido con material de préstamo; el Dique de relave grueso se recrecerá sobre el Dique de Arranque hasta alcanzar una altura final de 32 m. El relave grueso se almacenará delante del Dique de Arranque a medida que se produce, y será emplazado en forma compactada y constituyendo plataformas en forma de andenes. La capacidad de almacenamiento del Depósito es de 3 913 084 TM y su vida útil al ritmo actual de producción de la Concentradora resulta 6,3 años.
- Para hacer posible la construcción de este Depósito se instalará un Circuito de Clasificación compuesto por 04 Hidrociclones de 10" Ø; la operación de este circuito permitirá recuperar el 53% del relave como un producto de granulometría gruesa (U/F) y permeabilidad adecuadas para conformar el Dique de Contención con un talud aguas debajo de 3H:1V .
- En la construcción del Dique de Arranque se empleará principalmente el material cortado del talud del cerro donde se apoyará el Depósito de Relaves. El material de suelo orgánico que será extraído durante la construcción de la Presa de Relaves será trasladado en su totalidad a las Canchas de Relaves abandonadas para su revegetación.
- Par el Control del drenaje ácido durante la etapa Operativa, no se requerirá de ninguna medida adicional que el emplazamiento periódico siguiendo el método de Línea Central, y el riego ocasional con solución

alcalina (de la pulpa de relave) del relave grueso almacenado temporalmente. Para garantizar la estabilidad química permanente se ha previsto operar un Circuito de flotación de pirita durante el último año, que proporcionará un substrato con NNP positivo para la cobertura simple y revegetación del Dique de Contención. Esta innovación, junto con el plataformado del Dique, permitirán reducir significativamente el Costo y tiempo requerido para el Cierre del Depósito.

- Desde un inicio se operará con un sistema de bomba flotante para la eliminación del agua decantada en el Estanque del Depósito. De este modo no solo se reduce el costo de inversión de los Canales de fondo, Quenas y Torres de Decantación, empleadas tradicionalmente, sino que además se elimina el riesgo de fallas por los tubos ubicados en el Dique de Contención. Se espera asimismo eliminar los problemas operativos confrontados en el control del crecimiento y ubicación del espejo de agua.
- El diseño apropiado de la Presa de Relaves garantiza una estabilidad física permanente en condiciones estáticas y sísmicas.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Ministerio de Energía y Minas – República del Perú, Guía para el manejo de Relaves de Minas y Concentrados. Lima- Perú 1 995
- 2.-Villachica C. – Manzaneda J., Reingeniería de la Concentración de los Minerales Polimetálicos y sus Ventajas Económicas y Ambientales, Primer Simposio Nacional de Medio Ambiente y Seguridad Minera, Lima-Perú, 1 997
- 3.-CONSULCONT, Estudio de Estabilidad Química de Presas de Relaves. Lima 1 988
- 4.- Lara J – Barrera V, Presa de Relaves con Muros Resistentes de Arenas, Revista Minería, Edición 298, Lima - Perú.
- 5.- Quiroz I, Procesamiento de Minerales, Cuzco 1 986
- 6.- Steven G. Vick, Planning, Design, and Análisis of Tailings Dams, Canadá 1 990
- 7.- Ministerio de Energía y Minas- República del Perú, Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas. Lima-Perú 1 995
- 8.-Villachica C. – Llamosas J., Sistemas Metalúrgicos para el Control y Mitigación del Drenaje Acido, Primer Simposio Nacional de Medio Ambiente y Seguridad Minera, Lima-Perú, 1 997
- 9.- CANMET-MEND 1 990, Prediction Test Procedure Manual
- 10.- CONSULCONT S.A, - HIDROENERGIA S.C.R.L, Estudio de Estabilidad Física del Depósito de Relaves de Chinchán, Diciembre 1 997, Lima.
- 11.- CONSULCONT S.A, Estudio de la Estabilidad Química de la Presa de Relaves de Chinchán, Febrero 1 988 Lima.
- 12.- CONSULCONT S.A, Plan de Cierre de Presa de Relaves Bellavista 1999, Lima.
- 13.-Camero P, Encapsulamiento Concurrente de la Pirita en Presas de Relaves, Mayo 2 001, Potosí-Bolivia

ANEXOS

ANEXO 1

ALTERNATIVAS DE UBICACIÓN DE LA

PRESA DE RELAVES PROYECTADA

CUADRO 1.1.- UBICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA NUEVA PRESA DE RELAVES

| A | | B | | C | |
|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| Este | Norte | Este | Norte | Este | Norte |
| 383666 | 8713105 | 383611 | 8713620 | 386054 | 8714992 |
| 383896 | 8713062 | 384080 | 8713597 | 386727 | 8715175 |
| 383503 | 8712844 | 383538 | 8713422 | 386372 | 8714670 |
| 383416 | 8712271 | 383969 | 8713336 | 386840 | 8715057 |

| Parámetros de Diseño | A | | B | | C | | D | |
|----------------------------|------|---|------|---|------|---|------|---|
| | H:V | | H:V | | H:V | | H:V | |
| Presa de Relaves | | | | | | | | |
| Talud de terreno Trabajado | 2.5 | | 2.5 | | 1.5 | | 1.5 | |
| Dique Aguas Arriba | 1.5 | | 1.5 | | 1.5 | | 1.5 | |
| Dique aguas Abajo | 2.65 | | 2.65 | | 2.65 | | 2.65 | |
| Ancho de Creta | 8 | m | 6 | m | 10 | m | 10 | m |
| Altura | 7 | m | 22 | m | 52 | m | 52 | m |
| Borde Libre | 2 | m | 2 | m | 2 | m | 2 | m |
| Dique de Arranque | | | | | | | | |
| Talud | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | |
| Altura | 2 | m | 8 | m | 12 | m | 12 | m |

| | Diq-Arranq. | Dique | Estanque | Diq-Arranq. | Dique | Estanque | Diq-Arranq. | Dique | Estanque | Diq-Arranq. | Dique | Estanque |
|-------------------|-------------|--------|----------|-------------|---------|----------|-------------|-----------|-----------|-------------|---------|----------|
| Volumen (m3) | 35246 | 180851 | 359373 | 116156 | 705086 | 826040 | 164018.7 | 1048050.9 | 1669574.9 | 0 | 3701739 | 1721109 |
| Tonelaje (Tm) | 77541.2 | 367851 | 395310 | 255543.2 | 1434145 | 908644 | 360841.14 | 2131736 | 1836532 | 0 | 8143827 | 2581664 |
| Distribución (Tm) | | 48.2 | 51.8 | | 61.2 | 38.8 | | 53.7 | 46.3 | | 75.9 | 24.1 |

| | Conform.2 | Conform.4 | Conform.2 | Conform.4 | Conform.2 | Conform.4 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Volumen Total m3 | 575470 | 575470 | 1647282 | 1647282 | 2881645 | 5422849 |
| Capacidad m3 | 540224 | 359373 | 1531126 | 826040 | 2717626 | 1721109 |
| Capacidad Tm | 763161 | 539060 | 2342789 | 1239060 | 3968268 | 2581664 |
| Eficiencia % | 94 | 62 | 93 | 50 | 94 | 32 |
| Vida Util (años) | 1.2 | 0.9 | 3.8 | 2.0 | 6.4 | 4.2 |

Nota.- Conformado 2 Dique conformado con Relave Grueso producto del cicloneado
 Conformado 4 Dique conformado con Material de Prestamo

CUADRO 1.2.- EVALUACION DEL AREA DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA NUEVA PRESA DE RELAVES

| | | A | | B | | C | D |
|---------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Conform.2 | Conform.4 | Conform.2 | Conform.4 | Conform.2 | Conform.4 |
| Area de Presa | m ² | 117116 | 117116 | 107626 | 107626 | 175000 | 175000 |
| Area de Mat.de Prestamo | m ² | 11749 | 72032 | 38719 | 273747 | 6403 | 351485 |
| Area de Impacto Ambiental | m ² | 128865 | 189148 | 146345 | 381373 | 181403 | 526485 |

CUADRO 1.3.- COSTOS COMPARATIVOS DEL CONFORMADO DE LA PRESA PROYECTADA PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS

| | A | | | | B | | | | C | | D | |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | Conform.2 | | Conform.4 | | Conform.2 | | Conform.4 | | Conform.2 | | Conform.4 | |
| | Cost.Unit. \$/Tm | Cost.Total \$ |
| Diq.Arranq | 0.37 | 281968 | 3.21 | 1728776 | 0.40 | 929248 | 5.30 | 6569936 | 0.33 | 1312150 | 11.47 | 29613915.6 |
| Dique | 0.18 | 135843 | 0.00 | 0 | 0.18 | 417016 | 0.00 | 0 | 0.18 | 706352 | 0.18 | 459536 |
| Estanque | 0.19 | 146527 | 0.28 | 148780 | 0.19 | 449815 | 0.28 | 341981 | 0.19 | 761907 | 0.28 | 712539 |
| Total | 0.74 | 564338 | 3.48 | 1877556 | 0.77 | 1796080 | 5.58 | 6911917 | 0.70 | 2780409 | 11.92 | 30785991 |
| Vida Util (años) | | 1.2 | | 0.9 | | 3.8 | | 2.0 | | 6.4 | | 4.2 |

Nota.- Conformado 2 Dique conformado con Relave Grueso producto del cicloneado
 Conformado 4 Dique conformado con Material de Prestamo

ANEXO 2

PRUEBAS DE CLASIFICACION DE RELAVES CON

HIDROCICLONES

PRUEBAS CON CICLON DE 8"

PRUEBAS N° 1

Apex= 1 1/4
 Vortex=
 Presión=(1.4 , 1.0) bar
 Densidad Relave Final=(1230,1260)
 Fecha=25/03/01

CUADRO 2.1.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Promedio Densidad | Flujo lt/seg |
|------|---------------|---------------|----------------------|-----------------|
| FEED | 1150 | 1150 | 1150 | 11.04 |
| O/F | 1070 | 1090 | 1080 | 9.54 |
| U/F | 1620 | 1770 | 1695 | 1.50 |

| | |
|-----|-------|
| %U= | 63.36 |
| %O= | 36.64 |

CUADRO 2.2.- ANALISIS GRANULOMETRICO

| Mallas | % Peso | | | AC (-) | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | %F | %O | %U | %F | %O | %U |
| 20 | 0.02 | 0.03 | 0.11 | 99.98 | 99.97 | 99.89 |
| 35 | 0.36 | 0.01 | 1.07 | 99.62 | 99.96 | 98.82 |
| 50 | 3.12 | 0.04 | 7.13 | 96.50 | 99.92 | 91.69 |
| 70 | 5.25 | 0.08 | 10.91 | 91.25 | 99.84 | 80.78 |
| 100 | 4.49 | 0.04 | 8.50 | 86.75 | 99.80 | 72.28 |
| 150 | 10.90 | 0.39 | 18.84 | 75.85 | 99.41 | 53.44 |
| 200 | 7.93 | 0.57 | 11.87 | 67.92 | 98.84 | 41.57 |
| 325 | 13.26 | 2.40 | 17.27 | 54.67 | 96.44 | 24.30 |
| 400 | 3.46 | 1.60 | 4.15 | 51.21 | 94.84 | 20.16 |
| 635 | 11.02 | 9.38 | 8.57 | 40.19 | 85.46 | 11.59 |
| -635 | 40.19 | 85.46 | 11.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 100.00 | 100.00 | 100.00 | | | |
| %S | 23.10 | 11.30 | 58.30 | | | |

PRUEBAS N° 2

Apex= 1 1/16
 Vortex=
 Presión=(1.4 , 1.0) bar
 Densidad Relave Final=(1250)
 Fecha:29/03/2001

2.3.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Densidad 3 | Densidad 4 | Promedio Densidad | Flujo lt/seg |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|-----------------|
| FEED | 1210 | 1210 | 1080 | 1130 | 1158 | 11.78 |
| O/F | 1090 | 1100 | 1080 | 1070 | 1085 | 9.58 |
| U/F | 2400 | 1990 | 2020 | 2050 | 2115 | 2.20 |

| | |
|-----|-------|
| %U= | 53.09 |
| %O= | 46.91 |

2.4.- ANALISIS GRANULOMETRICO

| Mallas | % Peso | | | AC (-) | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | %F | %O | %U | %F | %O | %U |
| 20 | 0.05 | 0.03 | 0.16 | 99.95 | 99.97 | 99.84 |
| 35 | 0.56 | 0.01 | 1.94 | 99.39 | 99.96 | 97.90 |
| 50 | 3.82 | 0.04 | 9.47 | 95.57 | 99.92 | 88.44 |
| 70 | 6.04 | 0.14 | 12.87 | 89.53 | 99.78 | 75.57 |
| 100 | 5.57 | 0.14 | 9.90 | 83.96 | 99.64 | 65.67 |
| 150 | 11.07 | 1.09 | 19.60 | 72.90 | 98.55 | 46.07 |
| 200 | 8.39 | 1.50 | 13.55 | 64.51 | 97.06 | 32.52 |
| 325 | 13.48 | 5.09 | 17.56 | 51.02 | 91.97 | 14.96 |
| 400 | 3.51 | 2.43 | 3.25 | 47.52 | 89.54 | 11.71 |
| 635 | 10.48 | 12.44 | 5.96 | 37.04 | 77.10 | 5.75 |
| -635 | 37.04 | 77.10 | 5.75 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 100.00 | 100.00 | 100.00 | | | |
| %S | 26.94 | 14.24 | 75.07 | | | |

PRUEBAS CON CICLON D -10"

PRUEBA N° 1

Presión = 1.5 bar
 Apex = 1 9/16"
 Vortex = 2 1/2
 Fecha = 04/04/01
 Densidad Relave Final = (1250,1250)
 Amperaje 36Amp.

CUADRO 2.5.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Promedio Densidad | Flujo (lt/seg) 1 | Flujo (lt/seg) 2 | Promedio Flujo (lt/seg) |
|------|---------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| FEED | 1190 | 1180 | 1185 | 14.33 | 14.84 | 14.59 |
| O/F | 1100 | 1100 | 1100 | 11.75 | 12.27 | 12.01 |
| U/F | 1820 | 1840 | 1830 | 2.58 | 2.57 | 2.58 |

| | | | |
|----------|-------|-------|-------|
| %S | 31.33 | 21.24 | 68.03 |
| Densidad | 1264 | 1165 | 1830 |

| | | | |
|-----|-------|---------------|----|
| %U= | 46.80 | % -200 mallas | 25 |
| %O= | 53.20 | %+200 mallas | 75 |

PRUEBA N° 2

Presión = 2 bar
 Apex = 1 9/16
 Vortex = 2 1/2
 Fecha = 04/04/01
 Densidad Relave Final = (1240,1250)
 Amperaje 35.3

CUADRO 2.6.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Densidad 3 | Promedio Densidad | Flujo (lt/seg) 1 | Flujo (lt/seg) 2 | Promedio Flujo (lt/seg) |
|------|---------------|---------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| FEED | 1180 | 1170 | 1180 | 1177 | 16.40 | 15.68 | 16.04 |
| O/F | 1090 | 1090 | 1090 | 1090 | 13.51 | 12.76 | 13.14 |
| U/F | 1850 | 1830 | 1840 | 1840 | 2.89 | 2.92 | 2.91 |

| | | | |
|----------|-------|-------|-------|
| %S | 31.33 | 19.00 | 67.40 |
| Densidad | 1264 | 1145 | 1816 |

| | | | |
|-----|-------|---------------|----|
| %U= | 54.82 | % -200 mallas | 26 |
| %O= | 45.18 | %+200 mallas | 74 |

PRUEBA N° 3

Presión = 1.2 bar
 Apex = 1
 Vortex = 2 1/2
 Fecha = 05/04/01
 Densidad Relave Final = (1270,1270,1250)
 Amperaje 36 Amp.

CUADRO 2.7.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Densidad 3 | Promedio Densidad | Flujo (lt/seg) 1 | Flujo (lt/seg) 2 | Promedio Flujo (lt/seg) |
|------|---------------|---------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| FEED | 1220 | 1190 | 1200 | 1203 | 12.48 | 12.53 | 12.51 |
| O/F | 1150 | 1140 | 1150 | 1147 | 11.03 | 11.05 | 11.04 |
| U/F | 2200 | 2150 | 2230 | 2193 | 1.45 | 1.48 | 1.47 |

| | | | |
|----------|-------|-------|-------|
| %S | 27.75 | 20.80 | 79.35 |
| Densidad | 1227 | 1161 | 2123 |

| | | | |
|-----|-------|---------------|----|
| %U= | 33.94 | % -200 mallas | 27 |
| %O= | 66.06 | %+200 mallas | 73 |

PRUEBA N° 4

Presión = 0.8 - 0.85 bar

Apex = 1

Vortex = 2 1/2

Fecha = 05/04/01

Densidad Relave Final = (1270,1270)

Amperaje 36 Amp.

CUADRO 2.8.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Promedio Densidad | Flujo (lt/seg) 1 | Flujo (lt/seg) 2 | Promedio Flujo (lt/seg) |
|------|---------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| FEED | 1200 | 1210 | 1205 | 16.97 | 16.42 | 16.69 |
| O/F | 1180 | 1180 | 1180 | 15.88 | 14.92 | 15.40 |
| U/F | 2170 | 2170 | 2170 | 1.09 | 1.50 | 1.29 |

| | | | |
|----------|-------|-------|-------|
| %S | 27.75 | 23.84 | 78.47 |
| Densidad | 1227 | 1189 | 2097 |

| | | | |
|-----|-------|---------------|----|
| %U= | 20.22 | % -200 mallas | 26 |
| %O= | 79.78 | %+200 mallas | 74 |

PRUEBA N° 5

Presión = 1.5 bar

Apex = 1 1/4

Vortex = 2 1/2

Fecha = 05/04/01

Densidad Relave Final = (1270,1270)

Amperaje 35.3 Amp.

CUADRO 2.9.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Promedio Densidad | Flujo (lt/seg) 1 | Flujo (lt/seg) 2 | Promedio Flujo (lt/seg) |
|------|---------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| FEED | 1200 | 1200 | 1200 | 17.64 | 16.90 | 17.27 |
| O/F | 1120 | 1120 | 1120 | 15.46 | 14.80 | 15.13 |
| U/F | 2160 | 2160 | 2160 | 2.18 | 2.10 | 2.14 |

| | | | |
|----------|-------|-------|-------|
| %S | 27.75 | 16.43 | 76.47 |
| Densidad | 1227 | 1123 | 2040 |

| | | | |
|-----|-------|---------------|----|
| %U= | 51.96 | % -200 mallas | 24 |
| %O= | 48.04 | %+200 mallas | 76 |

PRUEBA N° 6

Presión = 2 bar

Apex = 1 1/4

Vortex = 2 1/2

Fecha = 05/04/01

Densidad Relave Final = (1270,1270)

Amperaje 35 Amp.

CUADRO 2.10.- BALANCE DE MASA

| | Densidad 1 | Densidad 2 | Promedio Densidad | Flujo (lt/seg) 1 | Flujo (lt/seg) 2 | Promedio Flujo (lt/seg) |
|------|---------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| FEED | 1220 | 1210 | 1215 | 21.88 | 21.30 | 21.59 |
| O/F | 1130 | 1110 | 1120 | 19.55 | 18.91 | 19.23 |
| U/F | 2180 | 2150 | 2165 | 2.33 | 2.39 | 2.36 |

| | | | |
|----------|-------|-------|-------|
| %S | 27.75 | 15.83 | 76.00 |
| Densidad | 1227 | 1118 | 2027 |

| | | | |
|-----|-------|---------------|----|
| %U= | 54.25 | % -200 mallas | 25 |
| %O= | 45.75 | %+200 mallas | 75 |

CUADRO 2.11.- RESUMEN DE PRUEBAS DE CLASIFICACION

| PRUEBAS CON CICLON DE 8" | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|----------------|
| Presión=(1.4 , 1.0) bar = cte | | | |
| Apex (pulg) | %U | %O | % -m200 |
| 1 1/4 | 63.4 | 36.6 | 42 |
| 1 1/16 | 53.1 | 46.9 | 33 |

PRUEBAS CON CICLON DE 10"

| Apex 1" = cte | | | |
|----------------------|-----------|-----------|----------------|
| Presión (bar) | %U | %O | % -m200 |
| 0.8 | 20.2 | 79.8 | 26 |
| 1.2 | 34.0 | 66.0 | 27 |

| Apex 1 1/4" = cte | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|----------------|
| Presión (bar) | %U | %O | % -m200 |
| 1.5 | 52.0 | 48.0 | 24 |
| 2.0 | 54.3 | 45.7 | 25 |

| Apex 1 9/16" = cte | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|----------------|
| Presión (bar) | %U | %O | % -m200 |
| 1.5 | 46.8 | 53.2 | 25 |
| 2.0 | 54.8 | 45.2 | 26 |

ANEXO 3

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Con la finalidad de evaluar la estabilidad física de la estructura del depósito de almacenamiento de relaves, se ha realizado una evaluación de la estabilidad de taludes de la estructura. Los parámetros de diseño utilizados fueron determinados basándose en estudios de exploración de campo y de ensayos estándar y especiales de laboratorio.

Análisis de Estabilidad de Taludes

La estabilidad de taludes se define en términos del factor de seguridad (FS) que se obtiene por el método de equilibrio límite. Para dicho análisis se debe tener en cuenta una serie de factores que influyen en la estabilidad de una estructura. Los factores que se toman en cuenta son: geometría del talud, parámetros geológicos - geotécnicos, cargas dinámicas por acción de los sismos, condiciones de flujo de agua, etc. No todos estos factores se pueden cuantificar en un modelo matemático; a pesar de estas limitaciones, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, nos permite tener una idea del comportamiento de la estructura.

Existen varios métodos para el análisis de estabilidad de taludes; el método utilizado en el estudio para el diseño de la presa de relaves es el de equilibrio límite propuesto por Bishop. El método de análisis de equilibrio límite supone que en el caso de una superficie de falla las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla, esta condición equivale a un factor de seguridad de 1.0. Los

parámetros de resistencia cortante de los materiales utilizados en el diseño de la estructura serán calculados mediante ensayos de laboratorio, de las muestras de relave fino, relave grueso, suelo de fundación, y el material que será utilizado en la construcción del dique de arranque.

Por otro lado, el Perú se encuentra en una zona de alta sismicidad, de manera tal que el riesgo sísmico tiene que ser necesariamente parte de la evaluación.

Método de Bishop

El método de Bishop Simplificado proporciona factores de seguridad muy próximos a aquellos obtenidos por métodos rigurosos. La superficie de falla es circular dividida en una serie de dovelas verticales en la que los valores de cohesión, fricción y presión de poros permanecen constantes. El factor de seguridad al deslizamiento está definido por la siguiente formula:

$$FS = \frac{\sum [c.b + W_i - u_i.b) \operatorname{tg} \bar{\phi}]}{\sum W_i . \operatorname{Sen} \alpha} \cdot \frac{1}{m_\alpha}$$

$$m_\alpha = \cos \alpha_i [1 + (\operatorname{tg} \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \bar{\phi} / FS)]$$

donde:

- FS : factor de seguridad
- C : cohesión
- Φ : ángulo de fricción interna
- b : ancho de dovela
- Wi : peso total de la dovela

u_i : presión de poros

α_i : ángulo de la base de la dovela con la horizontal

Esta ecuación no lineal se resuelve por iteraciones hasta alcanzar la convergencia en el cálculo del factor de seguridad.

Para tomar en cuenta el efecto del sismo en un análisis de estabilidad, se considera que la fuerza de inercia y la presión de poros inducidas por el movimiento sísmico, sea reemplazada por una fuerza estática horizontal F_i que es proporcional al peso de cada dovela. Este es el método de estabilidad pseudo – estático, donde la fuerza estática horizontal está dada por la siguiente formula:

$$F_i = K \cdot W_i$$

Donde K es el coeficiente sísmico y W_i es el peso de cada dovela.

Es necesario indicar que los análisis en relaves sueltos podrán ser analizados en la estabilidad post – sismo, en la cual las propiedades de los suelos ha variado.

Factores de Seguridad Mínimos

Para el caso de presas de tierra el **US Corps of Engineers** propone que los factores de seguridad mínimos requeridos para considerar un talud estable, son aquellos propuestos en el Cuadro 3.1.

Si se considera que una presa de relaves es una estructura cuyo comportamiento es bastante similar al de una presa de tierra para almacenamiento de agua, se puede concluir que los factores de seguridad mínimos indicados pueden servir como parámetros

comparativos para la evaluación del comportamiento estático y pseudo-estático de los taludes del depósito de relaves.

Cuadro 3.1.- Factores de Seguridad Mínimos para el Análisis de Estabilidad en Presas de Tierra

| Condición | Talud Aguas Arriba | Talud Aguas Abajo |
|--|---------------------------|--------------------------|
| I) Al final de la construcción Para presas de más de 15 m | 1.3 1.4 | 1.3 1.4 |
| II) Infiltración Constante | -- | 1.5 |
| III) Desembalse Rápido | 1.5 | -- |
| IV) Sismo | 1.0 | 1.0 |

Resumen de Factores de Seguridad Resultantes

| | FINAL | D. ARRANQUE |
|------------------------|--------------|--------------------|
| ESTATICO | 2.51 | 3.08 |
| PSEUDO ESTATICO | 1.66 | 2.15 |

FIGURA 3.1 A.- PRESA DE RELAVES PROYECTADO – ANALISIS ESTATICO
METODO DE BISHOP MODIFICADO

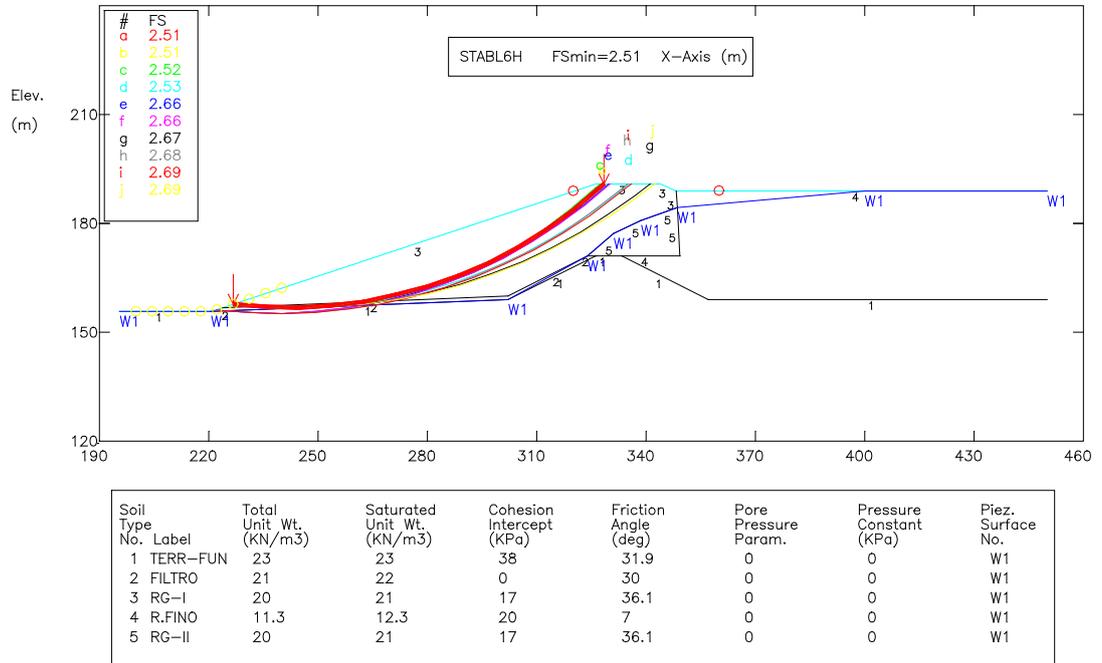


FIGURA 3.2 A.- PRESA DE RELAVES PROYECTADO – ANALISIS PSEUDO ESTATICO
METODO DE BISHOP MODIFICADO

