

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## DIVISIÓN DE INGENIERÍA

### DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y MINAS

# DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PRESAS DE JALES

## DISERTACIÓN

Para obtener el Título de:

## INGENIERO EN MINAS

1942  
Presentan:

### GERMÁN AARÓN CARRILLO LÓPEZ

### KAREN YAZMÍN CARRILLO LÓPEZ

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

EPA530-R-94-038  
NTISPB94-201845

# REPORTE TÉCNICO

## DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PRESAS DE JALES

Agosto 1994

Agencia de Protección Ambiental de E.U.  
Oficina de Desechos Sólidos  
Rama Residuos Especiales  
401 M Street, SW  
Washington, DC 20460



## AGRADECIMIENTOS

Este documento fue preparado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). La mención de compañías o nombres de productos no debe ser considerado un aval por el Gobierno EE.UU. o la EPA.

Las secciones de este documento se basan en gran medida en *Planificación, Diseño y Análisis de Presas de Jales* de Steven G. Vick (Bitech Publishers Ltd., 1990).

Esto es cierto particularmente en algunos conceptos y énfasis organizacionales, así como en muchas de las tablas y figuras. En algunos casos, este documento presenta un compendio del enfoque general de Vick, de la planificación y diseño de presas de jales. El permiso para usar *Planificación, Diseño y Análisis de Presas de Jales* como una fuente substancial fue proporcionado por el Sr. Vick, quien no es responsable por cualquier error de omisión o interpretación del presente documento.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. VISIÓN GENERAL DE LA DISPOSICIÓN DE JALES.....	3
2.1.- Métodos de disposición de jales.....	5
2.2.- Tipos de depósitos.....	6
2.2.1.- Depósitos en valle.....	8
2.2.2.- Depósitos en dique anular.....	13
2.2.3.- Depósitos en tajos.....	16
2.2.4.- Diseño del depósito en tajo especialmente excavado.....	16
3. DISEÑO DE DEPÓSITOS DE JALES.....	17
3.1.- Conceptos básicos de diseño.....	17
3.2.- Variables de diseño.....	19
3.2.1.- Factores específicos de jales.....	19
3.2.2.- Factores específicos del sitio.....	21
4. CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE, ESTABILIDAD Y FALLA.....	25
4.1.- Construcción del dique.....	25
4.2.- Métodos de construcción.....	26
4.2.1.- Construcción utilizando material de jales.....	27
4.2.2.- Método aguas arriba.....	29
4.2.3.- Método aguas abajo.....	31
4.2.4.- Método de línea central.....	33
4.2.5.- Diques construidos utilizando materiales alternativos.....	35
4.3.- Deposición de jales.....	35
4.3.1.- Descarga en punto único.....	35
4.3.2.- Descarga múltiple (Spigotting).....	36
4.3.3.- Ciclonado.....	36
4.4.- Análisis de estabilidad.....	39
4.4.1.- Análisis de red de flujo.....	39
4.5.- Modos de Falla.....	42
4.5.1.- Deslizamiento rotacional.....	42
4.5.2.- Fallo de cimentación.....	42
4.5.3.- Desbordamiento.....	42
4.5.4.- Erosión.....	43
4.5.5.- Tubificación.....	43
4.5.6.- Licuefacción.....	43
4.6.- Monitoreo del comportamiento.....	44
5. CONTROL Y MANEJO DEL AGUA.....	46
5.1.- Agua superficial.....	46
5.1.1.- Evaluación del agua superficial.....	47

5.1.2.- Controles del agua superficial. ....	49
5.2.- Filtración de jales. ....	50
5.2.1.- Flujo de filtración (Dirección y Cantidad). ....	50
5.2.2.- Calidad de filtraciones. ....	51
5.2.3.- Control de filtraciones. ....	52
5.3.- Tratamiento de agua de jales. ....	56
<b>6. CASO DE ESTUDIO: DEPOSITO DE JALES DE LA EMPRESA MINERA STILLWATER. ....</b>	<b>57</b>
6.1.- Evaluación del sitio, exploración de campo y pruebas de laboratorio. ....	58
6.1.1.- Evaluación del sitio. ....	58
6.1.2.- Exploración de campo. ....	58
6.1.3.- Pruebas de laboratorio. ....	59
6.2.- Evaluaciones de oficina. ....	60
6.2.1.- Evaluación de hidrología. ....	60
6.3.- Diseño de depósitos de jales. ....	63
<b>7. GLOSARIO. ....</b>	<b>65</b>
<b>8. REFERENCIAS. ....</b>	<b>68</b>

#### LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Comparación de los tipos de dique. ....	28
Tabla 2. Diseño calculado de inundaciones de la empresa minera Stillwater. ....	62

#### LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Presa Tradicional Tipo Retención de Agua para Disposición de Jales. ....	7
Figura 2. Tipos de diques: (a) Aguas Arriba, (b) Aguas abajo, (c) Línea Central. ....	8
Figura 3. Depósito Individual (a) y Múltiple (b) Transversal al Valle. ....	10
Figura 4. Depósito Individual (a) y Múltiple (b) en Ladera. ....	11
Figura 5. Depósito Individual (a) y Múltiple (b) en el Fondo del Valle. ....	14
Figura 6. Configuración Individual (a) y Segmentada (b) del Depósito en Dique Anular. ....	14
Figura 7. Superficie freática a través del depósito de jales. ....	18
Figura 8. Construcción del dique aguas arriba. ....	29
Figura 9. Construcción del dique aguas abajo. ....	32
Figura 10. Construcción del dique tipo línea central. ....	34
Figura 11. Ejemplos de redes de flujo en diques de jales. ....	41

## DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PRESAS DE JALES

### 1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de obtener los metales y otros minerales necesarios para los procesos industriales, fertilizantes, casas, automóviles y otros productos de consumo, grandes cantidades de roca son minados, triturados, pulverizados, y procesados para recuperar metales y otros valores de minerales. A menudo es necesario llevar a cabo una rutina muy compleja, para liberar los metales y minerales, dado que la industria minera produce enormes cantidades de partículas de roca fina, en tamaños que oscilan desde arena de tamaño pequeño hasta unas pocas micras. Estos residuos de grano fino son conocidos como "jales".

Hasta las últimas décadas, la mayoría de las minas eran operaciones subterráneas pequeñas con requerimientos consecuentemente modestos para la disposición de jales. Desde ese entonces, debido a la creciente demanda, se ha convertido económico sobre todo en minas grandes aprovechar esos depósitos que se consideraban de baja ley, mediante el uso de los avances efectuados por los fabricantes de equipos de minería y el desarrollo de tecnología de extracción y tratamiento. Esto ha incrementado considerablemente la cantidad de jales y otros residuos generados por los proyectos mineros individuales y por la industria minera en su conjunto.

Hay aproximadamente 1000 minas activas de metales, en los Estados Unidos (Randol, 1993) muchas de ellas tienen al menos un depósito de jales y a menudo varios depósitos agrupados conjuntamente en secciones. EPA estima que puede haber varios miles de depósitos de jales activos no asociados a la minería de carbón, y decenas de miles de depósitos inactivos o abandonados.

Por mucho, la mayor proporción de mineral extraído en la mayoría de sectores de la industria se convierte en última instancia en jales que deben ser dispuestos. En la industria del oro, por ejemplo, sólo unas pocas centésimas de una onza de oro se pueden producir por cada tonelada generada de jales secos. Del mismo modo, en la industria del cobre y generalmente en otras minas con minerales relativamente de baja ley que contienen tan solo un pequeño porcentaje de valores de metal; el residuo se convierte en jales. Por lo tanto, en general la disposición de jales es una parte importante en la operación de extracción y tratamiento, en la mayoría de los proyectos mineros de roca dura. Hay varios métodos utilizados para la disposición de jales. Estos incluyen la disposición de jales secos o espesados en depósitos o pilas auto soportantes, el relleno en trabajos mineros subterráneos y de cielo abierto, disposición subacuática, y el método más común, es la disposición de lodos de jales en depósitos. Modernos depósitos de jales están diseñados de estructuras artificiales para desechar de forma permanente los residuos de grano fino de las operaciones de extracción y tratamiento. En algunos proyectos, los diques de jales alcanzan varias decenas de metros de altura y los depósitos cubren varios kilómetros cuadrados.

---

Históricamente, los jales eran dispuestos en donde fuera más conveniente y rentable, frecuentemente en flujos de agua o directamente en drenajes. Como surgieron preocupaciones locales acerca de la sedimentación en los cursos de agua aguas abajo, el uso del agua y otros asuntos, las operaciones mineras comenzaron con la incautación de jales en presas de tierra, las cuales fueron frecuentemente construidas de jales y otros materiales de desperdicio. Los depósitos sirven con el doble propósito de contener los jales y, particularmente en el oeste árido, permitir la reutilización del agua escasa.

Más recientemente, han surgido preocupaciones acerca de la estabilidad y el desempeño ambiental de las presas y depósitos de jales. Las preocupaciones sobre la estabilidad se han elevado en parte por el uso de material residual en las presas y diques de jales; para mitigar esas preocupaciones, tales diques dependen frecuentemente de cierta cantidad de filtración controlada para intensificar la estabilidad, que a su vez afecta su desempeño ambiental. Ritcey (1989) ha especulado que la necesidad de depósitos sólidos en la industria del uranio "probablemente" responde en gran parte a la reciente atención que se presta al diseño de depósitos en otros tipos de instalaciones. Quizás desencadenada por la atención inicial a los depósitos de uranio, la creciente preocupación por el desempeño ambiental ha conducido a una mejor ingeniería en el diseño de presas de jales en otros sectores de la industria minera, tanto para la estabilidad y el desempeño ambiental. Por ejemplo, la experiencia ganada en revestimientos de las pilas de lixiviación está siendo transferida en recubrimientos para estanques de jales, y el uso de materiales de revestimiento sintético está creciendo (aunque el uso de revestimientos aún está lejos de ser una norma industrial). Adicionalmente, el uso de cianuro y otros reactivos tóxicos en los procesos de molienda han planteado preocupaciones especiales sobre algunos jales y está dando lugar a un mayor tratamiento previo a su disposición, así como a una mayor atención a su contención. Finalmente, las continuas preocupaciones sobre los drenajes ácidos de mina están dando como resultado una creciente investigación y conceptos emergentes de control a largo plazo o mitigación.

Los depósitos de jales inactivos también están recibiendo más atención debido a los efectos a largo plazo de la dispersión por el viento, la contaminación del agua subterránea y el drenaje ácido. En muchos casos, los costos de remediación pueden ser considerables, excediendo los costos originales del diseño y la operación del depósito de jales.

Si bien este informe analiza aspectos generales de las presas y depósitos de jales, los diseños reales para la disposición de jales son altamente específicos para cada sitio. El diseño depende de la cantidad y las características individuales de los jales producidos por las operaciones de mina y planta, así como las características climáticas, topográficas, geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del sitio de disposición, y los requisitos regulatorios relacionados con la seguridad de la presa y el desempeño ambiental. Lo que puede funcionar para un tipo de jales puede no funcionar para otro tipo, y puede no funcionar para los mismos jales en diferentes sitios. De ahí que cada situación requiere su propio proceso de diseño. La cantidad estimada de jales a ser desechados es particularmente importante dada la naturaleza cambiante de la mayoría de los proyectos mineros. Los cálculos de las cantidades de jales



se basan en las reservas estimadas que cambian continuamente a medida que progresa el desarrollo de la mina. En consecuencia, el tamaño final y el diseño de los depósitos de jales pueden diferir sustancialmente de las proyecciones iniciales. Esto representa grandes desafíos para los administradores de tierras federales y los responsables de conceder los permisos estatales, los cuales se enfrentan a la revisión y supervisión de la planeación, diseño y desempeño del depósito de jales, y para la población en general, quienes pueden pagar en última instancia por errores de cálculo que resulten en daños ambientales.

El propósito de este informe es proporcionar una introducción para los administradores de tierras federales, los responsables de conceder los permisos, y para la población en general sobre el tema de presas y depósitos de jales, particularmente con respecto a los aspectos de ingeniería y su capacidad de mitigar o minimizar los efectos adversos para el medio ambiente. El informe está basado en la literatura actual sobre ingeniería en depósitos de jales. Mientras se amplía en el alcance, el informe se limita necesariamente en su profundidad: una guía completa para el diseño y evaluación de depósitos de jales incorporaría la mayoría de materiales de varios análisis sobre ingeniería de presas de jales y desempeño ambiental, incluyendo aquellos textos por Vick (1990), Ritcey (1989) y CANMET (1977) entre otros.

También hay que señalar que la ingeniería de presas de jales está en continua evolución. El énfasis relativamente reciente sobre el desempeño ambiental está dando lugar a muchos cambios en el campo, muchos de los cuales todavía no están completamente comprobados. Vick (1990) puede ser el análisis más reciente y más completo de los temas tratados por este informe. En consecuencia, ciertas secciones de este informe se basan en gran medida en el enfoque de Vick.

La siguiente sección de este informe proporciona una visión general de los diversos métodos utilizados para disponer los jales mineros y los tipos de depósitos que se utilizan. La Sección 3 describe los conceptos básicos utilizados en el diseño de depósitos, incluyendo una serie de variables específicas del lugar de interés. La Sección 4 analiza las presas de jales y su estabilidad, mientras que la Sección 5 aborda brevemente la gestión del agua en las presas de jales. En la Sección 6 se presenta un caso de estudio sobre el recubrimiento de un depósito de jales. Por último, en la Sección 7 se enumeran todas las referencias citadas en el texto.

## **2. VISIÓN GENERAL DE LA DISPOSICIÓN DE JALES**

El objetivo final de un depósito es contener los jales de grano fino, a menudo con un fin secundario o co-propósito de conservar el agua para su uso en la mina y la planta. Esto tiene que ser realizado mediante un sistema rentable, de manera que proporcione estabilidad a largo plazo tanto en la estructura del dique y en los jales depositados como en la protección a largo plazo del medio ambiente. En el proceso de diseño de cualquier dique y depósito de jales, surgen tres intereses, el costo, la estabilidad y el desempeño ambiental, todo esto debe ser equilibrado, con condiciones específicas en

cada situación, las cuales establecen el balance para cada etapa del proceso. Vale la pena señalar que los costos a largo plazo de la disposición de jales dependen en parte de la estabilidad mecánica y la integridad del medio ambiente, así que, las estructuras estables y ambientalmente aceptables, promueven la rentabilidad.

Los depósitos de jales en forma de lodos son el método más común de disposición y es el enfoque principal de este informe. Los depósitos son favorecidos porque, entre otras cosas, son "atractivos económicamente y relativamente fáciles de operar" (Environment Canada, 1987). Los depósitos de jales pueden ser y están diseñados para desempeñar una serie de funciones, incluyendo funciones de tratamiento. Estas incluyen (Environment Canada, 1987):

- Eliminación de sólidos en suspensión por sedimentación.
- Precipitación de metales pesados como hidróxidos.
- Confinamiento permanente de los jales asentados.
- Homogeneización de las calidades de las aguas residuales.
- Estabilización de algunos componentes oxidables (por ejemplo, tiosales, cianuros, reactivos de flotación).
- Almacenamiento y estabilización del agua reciclada de proceso.
- Equilibrio del flujo incidental de las corrientes de aguas pluviales.

Hay, sin embargo, una serie de inconvenientes con los depósitos de jales que requieren atención en el diseño, incluyendo (Environment Canada, 1987):

- Dificultad para lograr una buena distribución del flujo.
- Dificultad para segregar el desagüe de las zonas no contaminadas.
- Dificultad para la recuperación, particularmente con los jales generadores de ácido, debido a las grandes áreas de superficie y las características de los materiales.
- El inconsistente rendimiento del tratamiento debido a las variaciones estacionales en la eficiencia de bio-oxidación.
- La recolección y el tratamiento de la filtración es costosa y difícil, mediante las estructuras de los depósitos.
- La dispersión de materiales finos por el viento es potencialmente grave a menos que la superficie se establezca por revegetación, aglutinantes químicos, o el cubrimiento con rocas.

## 2.1 Métodos de Disposición de Jales

Debido a que los jales mineros producidos por la planta están generalmente en forma de lodos, la disposición de los lodos de jales en depósitos hechos de materiales locales es el método más común y económico de disposición. Hay cuatro tipos principales de diseños de depósitos de lodos; depósitos en valle, depósitos en diques anulares, depósitos en tajos, y depósitos en tajos especialmente excavados (Ritcey 1989). Estas configuraciones de depósitos se explican con más detalle a continuación, dando mayor énfasis en los depósitos en valle, ya que son los más comunes. Antes de describir los depósitos, otros métodos diferentes de disposición de jales se describen brevemente a continuación.

En algunos casos, los jales se desaguan (espesados al 60 por ciento de densidad de pulpa o más) o secan (hasta un contenido de humedad de 25 por ciento o menos) antes de su disposición. La eficiencia y aplicabilidad de utilizar jales espesados o secos depende de la rutina del mineral y las concentraciones de yeso y arcilla así como de la disponibilidad de métodos alternativos. Excepto en circunstancias especiales, estos métodos pueden resultar sumamente caros debido al equipamiento adicional y los costos de energía. Sin embargo, las ventajas incluyen la minimización de los volúmenes de filtración y de los terrenos necesarios para un depósito, así como la deposición y recuperación de jales simultáneamente. (Vick 1990)

Los jales en forma de lodos a veces se disponen en las minas subterráneas como relleno para proporcionar apoyo en el suelo o en la pared. Esto disminuye las alteraciones de la superficie sobre el suelo y puede estabilizar las zonas ya extraídas. Por razones de estabilidad, el relleno subterráneo requiere de jales que tengan una alta permeabilidad, baja compresibilidad, y la capacidad de desaguarse rápidamente (es decir, una gran fracción de arena). Como resultado, sólo la fracción de arena de la totalidad de los jales es generalmente utilizada como material de relleno. La totalidad de los jales se puede mandar a un ciclón para separar la fracción de arena gruesa para rellenar, dejando sólo los lodos para ser dispuestos en un depósito. Para aumentar la capacidad estructural, el cemento se puede añadir a la fracción de arena antes de rellenar (Environment Canada 1987).

El relleno a cielo abierto también se practica, cuando los jales se depositan en tajos abandonados o porciones de tajos activos. La operación de reprocesamiento de jales de Pinto Valley, ubicada en Arizona, utiliza este método para disponer de los jales de cobre. En tajos activos, los diques pueden ser necesarios para mantener los jales fuera de la zona activa.

Sin embargo, ya que la filtración de los jales puede afectar negativamente a la estabilidad de las paredes del tajo o dique, es raro ver su disposición en tajos activos. Por ejemplo, Williams (1979), describe una falla debida a la presión de poros de agua en el suelo de un tajo en Australia. Ritcey (1989) señala que los parámetros hidrogeológicos que afectan la migración de las filtraciones y los contaminantes son poco conocidos, por lo que los jales con contaminantes tóxicos o residuos reactivos pueden ser malos candidatos para este tipo de depósitos. La Oficina de Minas de E.U. señala que otras

limitaciones para el uso de minas activas de tajo abierto para la disposición de jales son la pérdida de áreas de tajo para recursos futuros y las posteriores restricciones en las operaciones y en el diseño de mina a las que serían sometidos los operadores de mina.

La disposición subacuática en un lago profundo u océano es también un posible método de disposición. La disposición submarina puede prevenir la oxidación de minerales de sulfuro en los jales, lo que inhibe la generación de ácido. La disposición subacuática ha sido recientemente practicada por ocho minas en Canadá, tres aún activas en 1990 (Environment Canada, 1992). La disposición subacuática se utiliza en zonas con alta precipitación, terrenos de gran pendiente, o de alta sismicidad o, en Canadá, donde su uso es anterior a la normativa vigente. Este método también se limita a los jales gruesos que pueden asentarse rápidamente. El CANMET (Centro Canadiense de Minerales y Tecnología Energética) completó una escala de banco de 16 años de simulación de la disposición de las profundidades del lago utilizando agua del río Ottawa (Ritcey y Plata 1987). Encontraron que los jales tenían poco efecto sobre el pH al usar minerales con un bajo contenido de sulfuro. Ripley, et al. (1978), encontró que los jales pueden cubrir grandes áreas en el fondo del mar o de un lago y causar problemas de turbidez si la práctica de disposición no es diseñada correctamente. Hay pocos datos sobre el efecto a largo plazo de la disposición subacuática (Environment Canada 1987), a pesar de que se está estudiando en Canadá y ha sido revisada por CANMET (CANMET 1993).

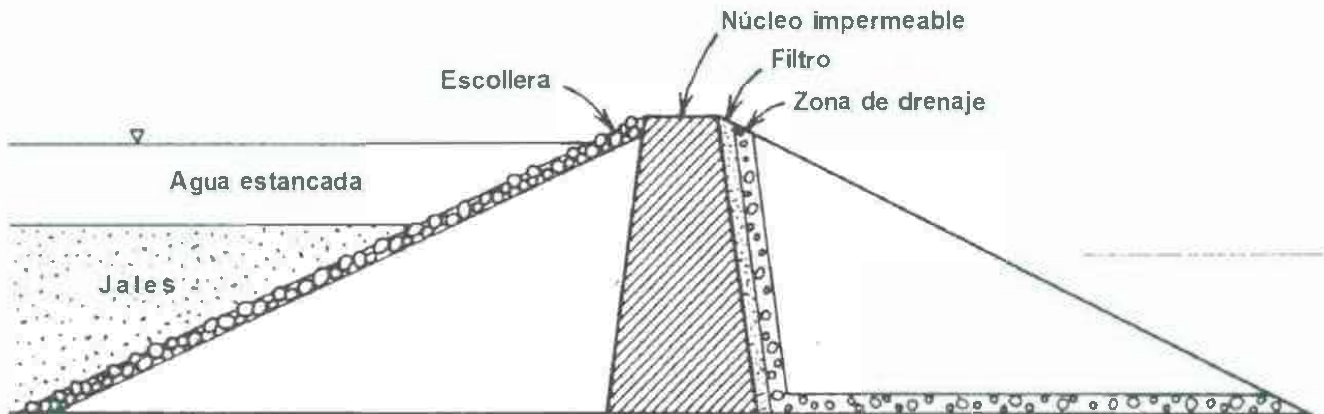
Una variación en la disposición subacuática en el mar o lagos sería una inmersión permanente de jales en un tajo o depósito. Esto podría presentar muchas de las mismas ventajas de disposición bajo el agua (es decir, la reducción de la oxidación de minerales de sulfuro), pero también requeriría de la atención a largo plazo para asegurar los niveles de agua constantes y posiblemente el monitoreo de los impactos potenciales del agua subterránea.

## **2.2 Tipos de Depósitos**

Hay dos tipos básicos de estructuras utilizadas para retener los jales en depósitos, el dique elevado por etapas y las presas de retención tradicionales. Debido a que los diques elevados por etapas son mucho más comunes que las presas de retención tradicionales, estos se enfatizan en este informe. Cualquier tipo de estructura, diques elevados por etapas o presas de retención tradicionales, se pueden utilizar para formar diferentes tipos o configuraciones de depósitos de jales. Existen cuatro tipos principales de depósitos donde se incluye el dique anular, en tajos, en tajos especialmente excavados y las variaciones del diseño en valle. La elección de diseño depende principalmente de la topografía natural, las condiciones del sitio y los factores económicos. La mayoría de las presas de jales en operación de hoy en día son una forma del diseño en valle. Dado que los costos son a menudo directamente relacionados con la cantidad de material de relleno usado en la presa o dique (es decir, su tamaño), se pueden realizar importantes ahorros minimizando el tamaño de la presa y maximizando el uso de materiales locales, en particular los propios jales.

Las presas de retención tradicionales se construyen con su altura completa desde el principio de la disposición, mientras que los diques elevados se construyen por etapas a medida que surja la necesidad de capacidad de disposición adicional. Los diques elevados por etapas comienzan con un dique de arranque con más altura, elevándose el dique conforme aumenta el volumen de jales en el depósito.

Las presas de retención de jales (Figura 1) son similares a las presas de retención de agua en lo que respecta a las propiedades del suelo, agua superficial y controles de agua subterránea, y consideraciones de estabilidad. Son adecuados para cualquier tipo de jales y método de deposición.



**Figura 1. Presa Tradicional Tipo Retención de Agua para Disposición de Jales**

(Fuente: Vick 1990)

Los diques elevados por etapas se pueden construir utilizando los métodos de aguas arriba, aguas abajo, o de la línea central, los cuales se explican con más detalle en una sección más adelante (véase Figura 2). Cada una de las estructuras en la Figura 2, por ejemplo, se construyen en cuatro levantamientos sucesivos, con el material de construcción y la capacidad de llenado aumentando gradualmente con cada levantamiento sucesivo. Lo anterior tiene un costo de capital inicial más bajo que las presas de retención, porque el material de relleno y los costos de colocación se van dando en fases a lo largo de la vida del depósito. Las opciones disponibles para el material de construcción se incrementan debido a las pequeñas cantidades necesarias en cada ocasión. Por ejemplo, las presas de retención generalmente utilizan el suelo natural, mientras que los diques elevados por etapas pueden utilizar suelo natural, jales y roca estéril, en cualquier combinación. (Vick 1990)

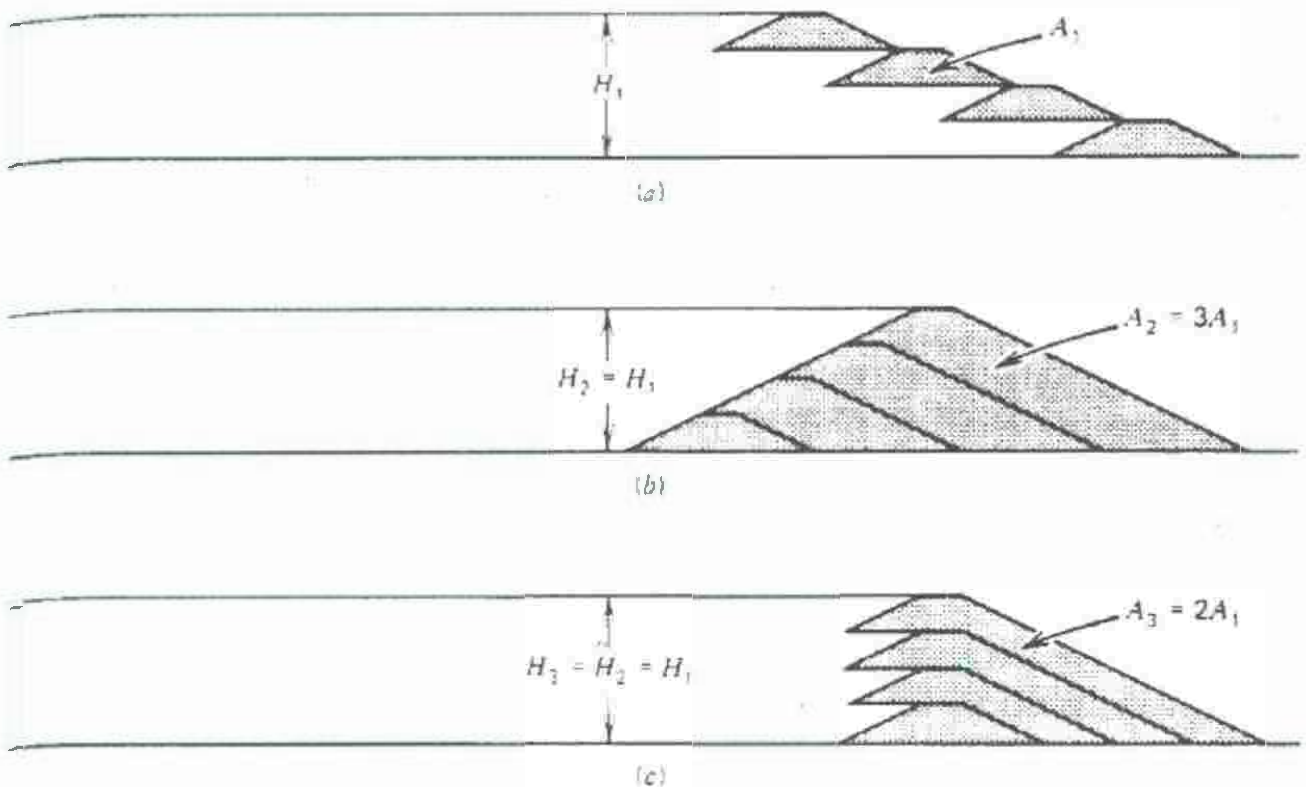


Figura 2. Tipos de diques: (a) Aguas arriba, (b) Aguas abajo (c) Línea central

(Fuente: Vick 1990)

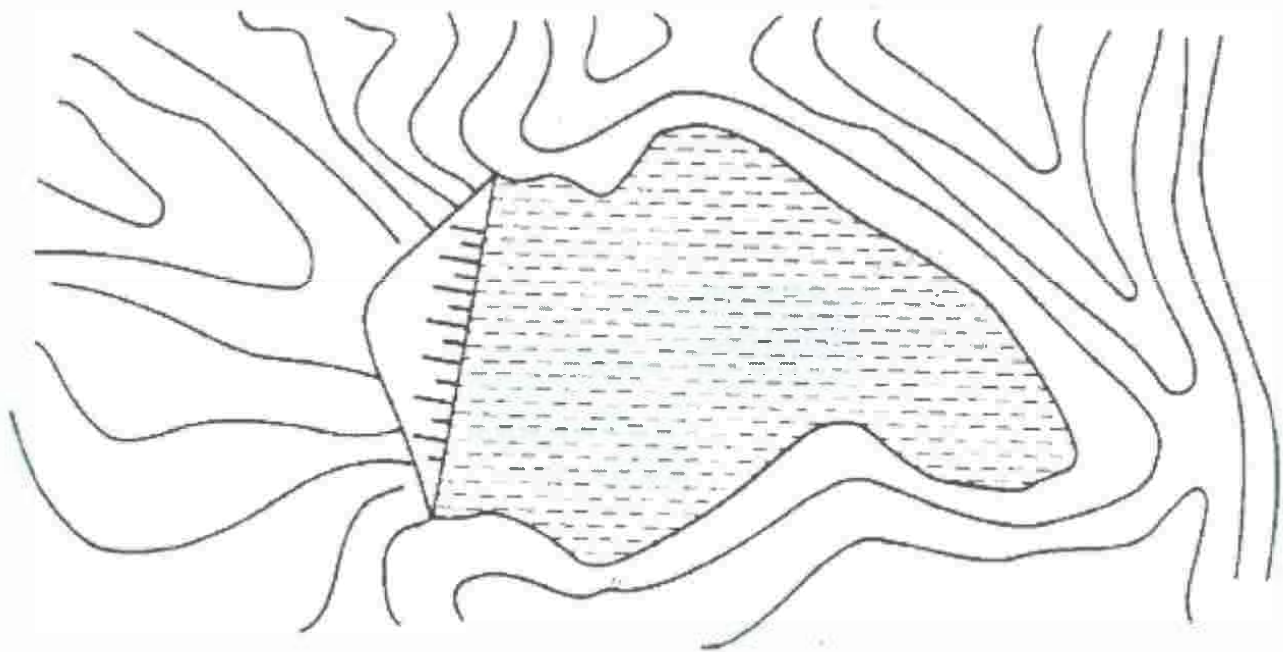
Por último, el carácter gradual de los diques elevados por etapas hace posible intentar hacer frente a los problemas que puedan surgir durante la vida de un depósito de jales. Por ejemplo, en las lluvias en las instalaciones de Nevada, no se planificaron las filtraciones debajo y a través de la base del dique de jales, por lo que hubo que hacer cambios muy necesarios de diseño. El hecho que se trataba de un dique elevado por etapas hizo posible intentar soluciones de ingeniería para el problema, conforme la presa fue ampliada y elevada durante las fases posteriores a la construcción, y esto se pudo conseguir sin poner el depósito fuera de servicio y sin mover enormes cantidades de material de relleno o jales depositados.

### 2.2.1 Depósitos en Valle

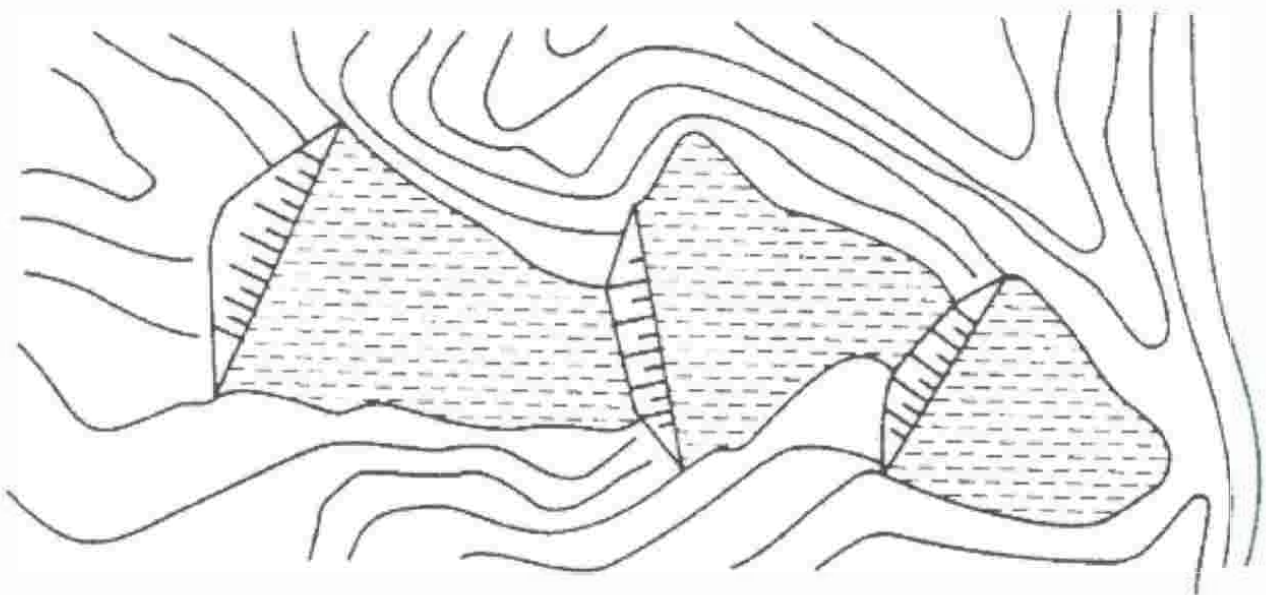
En igualdad de condiciones, es económicamente ventajoso utilizar depresiones naturales para contener los jales. Entre otras ventajas se reduce el tamaño de los diques, ya que las laderas del valle u otra depresión sirven para contener los jales. Además, los jales en valles u otras depresiones naturales presentan menos ayuda para la dispersión en el aire de material de jales. Como resultado, los depósitos en valle (y variaciones) son los más utilizados comúnmente. Los depósitos en valle se pueden construir por separado, en el que los jales están contenidos detrás de un solo dique; o en forma

múltiple, en cuyo caso una serie de diques contienen los jales en los depósitos conectados por escalones.

Existen diversas variaciones de los depósitos de tipo valle. El diseño a través del valle se utiliza con frecuencia ya que se puede aplicar a casi cualquier depresión topográfica ya sea en forma individual o múltiple. Presentado de manera similar a una presa de almacenamiento de agua convencional, el dique se construye conectando dos paredes del valle, confinando los jales en la topografía natural del valle. Esta configuración requiere menos material de relleno y en consecuencia es favorecida por razones económicas. El depósito está mejor situado cerca de la cabecera de la cuenca de desagüe para minimizar los flujos de inundación. Se pueden usar zanjas de desviación por las laderas para reducir el ingreso normal del escurrimiento si la topografía lo permite, pero grandes escorrentías de inundación podrán ser manejadas por la capacidad de almacenamiento de la presa, aliviaderos, o diques independientes de control de agua, situados aguas arriba del depósito. La Figura 3 muestra la configuración individual y múltiple del depósito a través del valle.



(a)

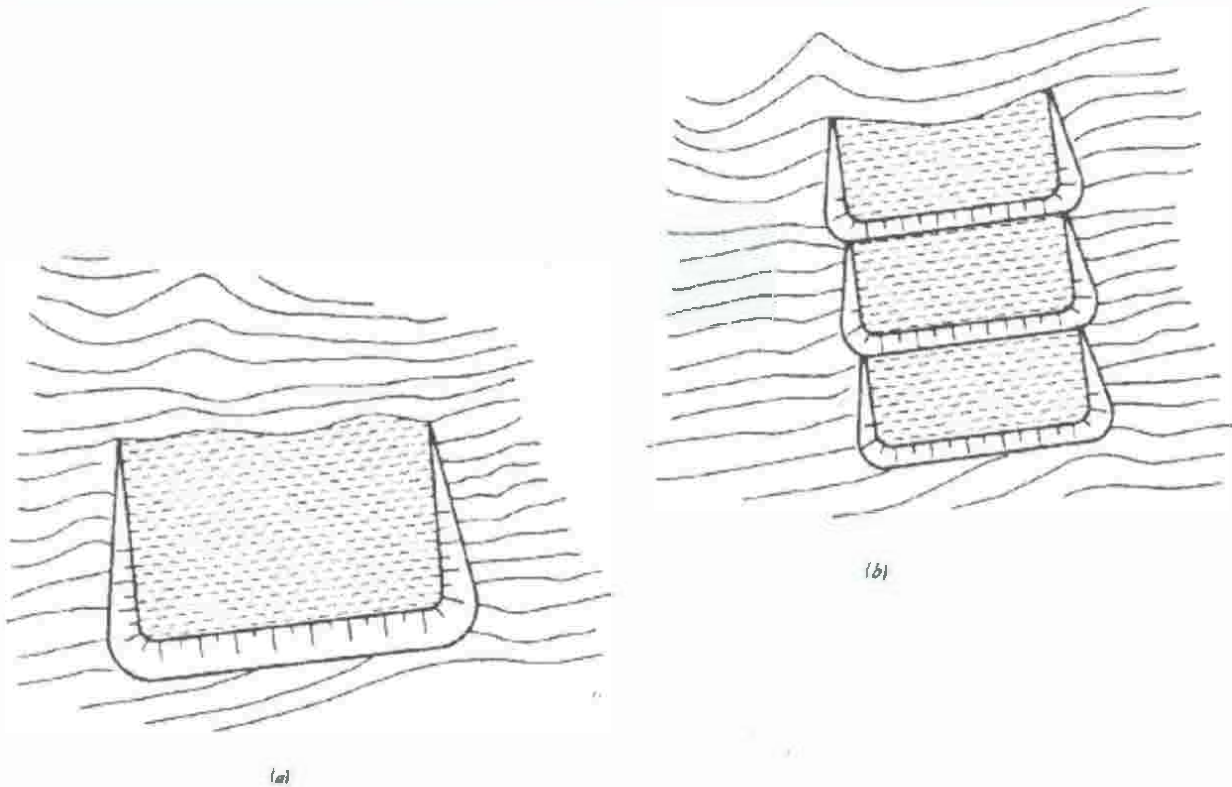


(b)

**Figura 3. Depósito Individual (a) y Múltiple (b) Transversal al Valle**

(Fuente: Vick 1990)





**Figura 4. Depósito Individual (a) y Múltiple (b) en Ladera**

(Fuente: Vick 1990)

Otros tipos de depósitos en valle pueden ser empleados cuando existe un área excesivamente grande de captación de desagüe y/o existe una carencia en la topografía deseada del valle. Dos variaciones son el depósito en ladera y el depósito en el fondo del valle. El diseño en ladera, consiste en una presa de tres lados construida contra una ladera (Figura 4). Este diseño es óptimo para pendientes inferiores al 10% de grado. La construcción en pendientes más pronunciadas requiere mucho más volumen de llenado para alcanzar el volumen de almacenamiento suficiente (especialmente cuando se utiliza el método de construcción aguas abajo).

Si la zona de captación de desagüe es demasiado grande para una presa transversal al valle y la pendiente del terreno es demasiado empinada para un diseño en ladera, entonces una combinación de estos dos diseños, puede considerarse utilizando el depósito en fondo de valle (Figura 5). Los depósitos en fondo de valle con frecuencia se colocan en forma múltiple ya que el fondo del valle se levanta, con el fin de lograr un mayor volumen de almacenamiento. Debido a que la zona de captación de aguas arriba es relativamente grande, con frecuencia, o normalmente, es necesario conducir las corrientes de aguas arriba alrededor (y/ o) bajo los depósitos en fondo de valle.

Las configuraciones de presas en valle, son a menudo la elección óptima por razones económicas. Esto se debe a que las paredes del valle forman uno o más lados, de modo que la longitud del dique se reduce, minimizando los costos de construcción. Sin embargo, la disminución de los costos de

construcción y la baja profundidad media de jales en el dique puede verse contrarrestada por un aumento en la mitigación ambiental y un incremento de los costos de cierre y recuperación.

El diseño de presa en valle es particularmente sensible a desbordamientos por inundaciones, a erosión cerca de la intersección del dique y la ladera del valle, y a licuefacción debido a los mayores volúmenes de entrada de flujo de agua superficial a partir de los desagües en la cuenca natural de captación y a ingresos/desbordamientos debido a grandes precipitaciones. Tal como se describe en detalle más adelante, la estabilidad de una presa de valle depende en gran medida del nivel de la presión hidrostática dentro del material de relleno y el dique. Un incremento inusual de la presión hidrostática de una sola ocasión por arriba del nivel de diseño, puede ser suficiente para desencadenar la falla. El control de los flujos de entrada a través, alrededor, o bajo el depósito es importante para mantener la estabilidad estructural y para controlar los impactos ambientales. Proporcionar el drenaje interno adecuado puede ayudar a proteger contra la licuefacción, y mejorar la permeabilidad y consolidación de los jales, mejorando así la estabilidad de la estructura.

Debido a que se requiere un dique más corto en esta configuración, es más factible considerar núcleos impermeables y drenajes internos como medios para controlar la superficie freática y promover la estabilidad del dique. Los controles para agua superficial también pueden ser necesarios. Los canales de desviación no siempre pueden ser una opción debido a la dificultad de su construcción a lo largo de las laderas empinadas del valle. Sin embargo, los conductos cerrados pueden ser un método de desvío alternativo. Otra alternativa de control del agua superficial en el diseño de valle es construir una presa de almacenamiento de agua más pequeña aguas arriba de la presa de jales para captar el agua y desviarla alrededor de los jales o utilizarla en la planta. Un factor relacionado con el agua, que también debe tenerse en cuenta, sobre todo en los depósitos en valle, es la presencia de aguas poco profundas del suelo aluvial. El agua subterránea puede infiltrarse en los jales, elevando así el nivel de la saturación dentro de los jales; esto puede ser estacional, en respuesta a los flujos de agua superficiales en temporada alta que se interconectan con la pendiente de subida de aluviones en el depósito (o bajo el propio depósito).

Cabe señalar que cualquier diseño que se requiera para desviar o controlar de otra manera los flujos de agua durante la vida activa del depósito tiene que considerar los periodos posteriores. El balance hídrico puede ser más favorable después de que los lodos de jales ya no se añadan al depósito y así la estabilidad de la presa puede resultar una preocupación menor. Sin embargo, si hay contaminantes tóxicos en los jales, o si los jales son reactivos, el diseño debe tener en cuenta el desempeño ambiental después de la estabilización de la superficie y la recuperación.

La estabilidad del depósito de jales depende también de (o al menos está relacionada con) sus características de cimentación, tales como resistencia al corte, compresión, y permeabilidad. Dependiendo de las características del suelo, el diseño en valle puede adaptarse tomando en cuenta los materiales de alta permeabilidad en el diseño mediante el uso de revestimientos y/o drenaje interno

adecuado. Las características del suelo a menudo se pueden mejorar a través de la compactación del terreno. Además, el método de deposición de jales y la construcción incrementa la repercusión sobre el diseño del depósito en valle. La deposición de jales afecta la consolidación, la permeabilidad, la fuerza y, consecuentemente, la estabilidad del material del dique. Todos estos factores se analizan en secciones posteriores.

En algunos casos, los revestimientos o zonas de baja permeabilidad pueden resultar medios adecuados de control de la filtración para mejorar la estabilidad o el desempeño ambiental. El frente de aguas arriba de las presas de jales/diques (es decir, el lado que hace contacto con los jales), por ejemplo, está diseñado con frecuencia para proporcionar una capa de baja permeabilidad o para ser impermeable. El efecto consiste en reducir la superficie de la capa freática a través del dique. Esto generalmente se logra con una fracción de lodos de jales y / o con materiales sintéticos.

Revestir toda el área del depósito es más problemático, tanto por los costos como por las irregularidades en las laderas y los suelos del valle que hacen difícil garantizar la integridad del revestimiento uniforme. Los revestimientos o capas de baja permeabilidad pueden ser necesarios, no obstante, para impedir los flujos hacia y desde el agua subterránea subyacente. Más común que los revestimientos sintéticos o arcilla impermeable es la práctica de la compactación del suelo nativo, incluyendo cualquiera de las arcillas locales disponibles, para reducir la permeabilidad a un nivel aceptable; los lodos deshidratados o secos del sitio también se pueden usar en algunos casos. En caso de que un revestimiento o capa de baja permeabilidad sea necesaria, debe ser diseñada tomando en cuenta las cargas del depósito, los asentamientos diferenciales, las filtraciones tóxicas o corrosivas y los efectos del intemperismo. Si los depósitos se des-saturaran después de la recuperación, por ejemplo, la arcilla o los lodos pueden agrietarse y brindar una ruta para que el agua subterránea ingrese en los jales o para que las filtraciones contaminadas entren en las aguas subterráneas. Del mismo modo, las capas de arcilla o lodos que están preparadas con anticipación a la expansión final del depósito, pueden desarrollar grietas si se les permite secarse antes de ser cubiertas con jales.

### 2.2.2 Depósitos en Dique Anular

Donde las depresiones topográficas naturales no están disponibles, la configuración del dique anular puede ser apropiada (Figura 6). En lugar de un dique grande (como en el diseño en valle), se requieren diques en todos los lados para contener los jales. La construcción puede ser similar a las presas en valle, con jales, desecho de roca, y/u otros materiales nativos usados habitualmente en fases posteriores a la construcción. Debido a la longitud del dique/presa, más materiales son necesarios para esta configuración, y el material para los diques circundantes iniciales es normalmente excavado del área del depósito.

---

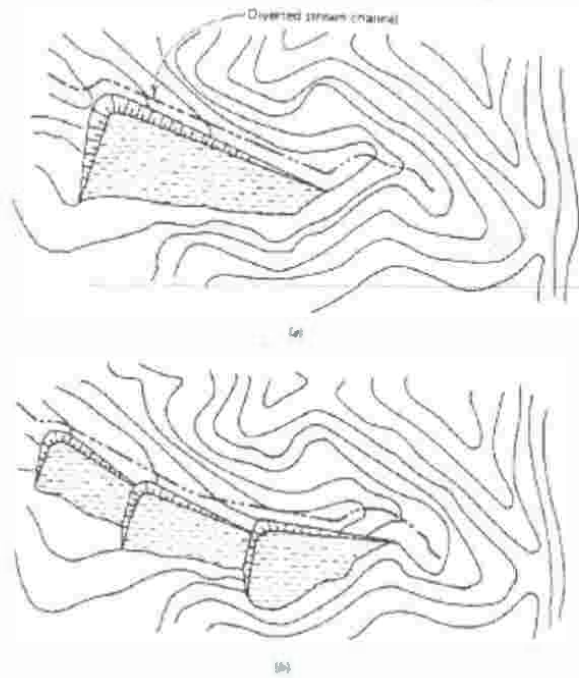


Figura 5. Depósito Individual (a) y Múltiple (b) en Fondo de Valle

(Fuente: Vick 1990)

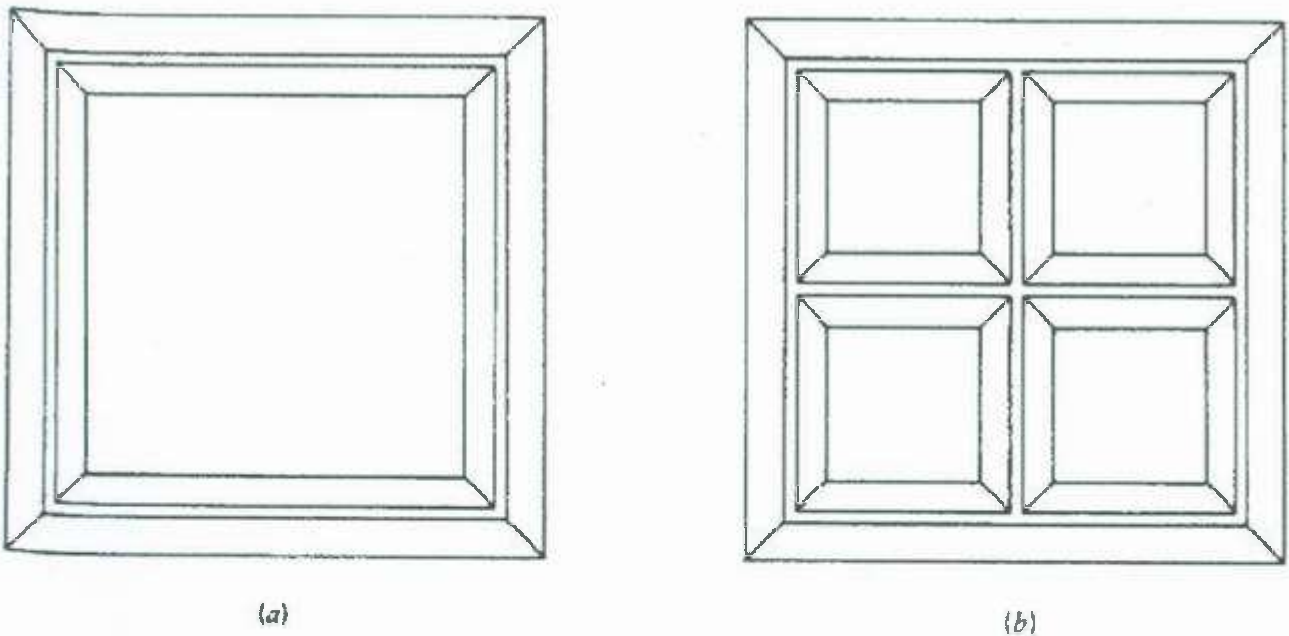


Figura 6. Configuración individual (a) y Segmentada (b) del Depósito en Dique Anular

(Fuente: Vick 1990)

Según Ritcey (1989), las presas de diques más recientes se han construido utilizando métodos en aguas abajo o en línea central en lugar del método en aguas arriba (ver más abajo para la descripción de los distintos tipos de construcción); Ritcey cita a Green (1980), informando que no existe certeza sobre la estabilidad de diques en aguas arriba a largo plazo.

Se requieren diques en todos los lados, por lo que en este método se utiliza una gran cantidad de relleno para los diques en relación con el volumen de almacenamiento. Este diseño se puede organizar de forma individual o segmentada. La geometría regular típicamente utilizada en esta configuración hace que sea susceptible a la instalación de diversos tipos de revestimientos. (Vick 1990)

Si el terreno es plano y por consiguiente adecuado para diques anulares, esta configuración permite la máxima flexibilidad en la selección de un sitio. Dado que los diques son relativamente bajos en altura, el diseño es a menudo más simple que un diseño de presa en valle alto. La contención se puede lograr mediante el uso de un núcleo impermeable en los diques y/o el uso de un revestimiento por debajo del depósito.

A diferencia de los depósitos en valle, que se encuentran en un área de captación natural, el diseño del dique anular permite un mejor mantenimiento al control del agua. La cantidad de agua del estanque se limita a lo transportado con los jales y a cualquier precipitación que cae directamente sobre el depósito. No hay otra escurriente que sea fuera de las laderas exteriores. Dado que los escurrimientos superficiales y los impactos de las inundaciones se reducen, se requiere un área de estanque más pequeña y/o medidas de control del agua menos elaboradas. Se puede hacer una compensación con una profundidad más alta de jales la cual reduce el área de superficie y da como resultado menos filtraciones. También hay inconvenientes en este diseño, incluyendo los volúmenes de material relativamente grandes necesarios para la construcción, y su repercusión en el costo. El aumento de la longitud de las paredes del dique también puede aumentar la posibilidad de una falla (Robertson 1984, citado en Ritcey 1989). Otras desventajas del sistema de dique anular, son que el depósito se eleva por encima del terreno circundante, creando un problema estético en algunos lugares, y puede haber una considerable erosión eólica en los jales. En muchas áreas, también, no hay terreno plano apto para los diseños de diques anulares.

Aunque cada situación debe ser evaluada en función de sus propias características, el sistema de dique anular tiene el potencial para un mejor control de las filtraciones que el encontrado en la mayoría de los sitios de presas en valle. Si se justifica por las características de unos jales particulares, casi una contención total y recogida de efluentes se puede lograr mediante una combinación adecuada de núcleos de baja permeabilidad, revestimientos y sistema de drenaje. Debido a que el control de la filtración es a menudo un problema ambiental urgente en los depósitos de jales, el sistema de dique anular puede tener una ventaja importante sobre la mayoría de los otros diseños.

### 2.2.3 Depósitos en Tajos

Este método es mucho menos común que los depósitos en valle y en dique anular. Consiste en disponer el material de jales en un tajo extraído previamente. El diseño elimina inicialmente la necesidad de construcción del dique.

Dado que los jales están protegidos por las paredes del tajo, la dispersión por el viento se reduce al mínimo. Un buen drenaje puede ser incorporado en el diseño. Muchos de los modos comunes de fallo en diques de jales (por ejemplo, tubificación, licuefacción) no se aplican a este diseño. La falta de muros en la presa reduce la posibilidad de fallas de pendiente, pero la estabilidad en los taludes del tajo tiene que ser revisada.

A menos que el propósito sea aislar jales de sulfuro debajo del agua, el nivel freático debe estar por debajo de los jales dispuestos en el tajo. Esto puede requerir relleno con rocas de mina o sobrecarga. Si es necesario rellenar debajo de los jales, y/o si la roca circundante no es suficientemente impermeable, se puede requerir de un revestimiento. Ritcey (1989) señala que los parámetros hidrogeológicos que afectan a la migración de las filtraciones y contaminantes, son poco comprendidos, por lo que los jales con contaminantes tóxicos o jales reactivos son candidatos inadecuados para este tipo de depósito.

Cuando la minería en un tajo activo avanza lateralmente, la porción extraída fuera del tajo puede ser la adecuada para la disposición de jales. En tales casos, los diques se deben construir para depositar los jales fuera de la zona minada. Este dique podría entonces ser planteado en un enfoque por fases (Ritcey 1989).

### 2.2.4 Diseño del Depósito en Tajo Especialmente Excavado

Este diseño es bastante inusual y consiste en la excavación de un tajo específicamente con el propósito de disposición de jales. El depósito consiste en cuatro o más pilas con revestimientos impermeables y rodeados por una presa más grande. El material extraído del tajo se utiliza en la construcción de la presa. Este diseño tajo/presa excavado tiene algunas de las mismas ventajas que el diseño de dique anular, incluida la independencia del sitio y la forma uniforme.

La independencia del sitio beneficia al diseño, ya que se necesita menos esfuerzo y costo para contrarrestar los obstáculos topográficos, las condiciones del suelo, las condiciones climáticas y los obstáculos de la construcción. La distribución uniforme, la forma y el terreno plano impiden el escurrimiento superficial de entrada en el depósito y disminuye los requisitos para las medidas de control de inundaciones.

### **3. DISEÑO DE DEPÓSITOS DE JALES**

El diseño real de una presa y depósito de jales ocurre únicamente después de que el sitio ha sido seleccionado. Sin embargo, la selección del sitio y el diseño son considerados mejor como un proceso dinámico. Una serie de principios de diseño debe afectar el proceso de selección del sitio, así como la determinación del tipo de dique y la configuración del depósito. Esta sección describe primeramente algunos de estos principios fundamentales de diseño, así como las principales variables de diseño y los factores específicos del sitio que influyen en el diseño final. Como se señaló anteriormente, las principales consideraciones en el diseño de una presa y depósito de jales son la estabilidad, el costo y el desempeño ambiental.

#### **3.1 Conceptos Básicos de Diseño**

En general, los depósitos de jales (y los diques que los confinan) se diseñan utilizando la información sobre las características de los jales, materiales de construcción disponibles, los factores específicos del sitio (como la topografía, la geología, hidrología y sismicidad) y los costos, con interacción dinámica entre estos factores ejercen una influencia en la localización (o emplazamiento) y el diseño real del depósito. Dado que el agua es un componente importante en cualquier sistema de depósito de jales, los principios de la hidrología (aplicados al flujo de agua a través y alrededor del dique de jales) dictan muchas de las reglas de diseño del depósito de jales. De hecho, debido a que la estabilidad del depósito y la presa son en gran parte una función del nivel de agua, estos principios son una preocupación fundamental en el diseño de cualquier depósito de jales.

Uno de los principios básicos utilizados en el diseño de depósitos y sus diques es el mantenimiento de la superficie freática en el dique. La superficie freática es el nivel de saturación en el depósito y el dique (la superficie a lo largo de la cual la presión del fluido es igual a la presión atmosférica (CANMET 1977)); en los sistemas naturales a menudo se llama el manto freático. La superficie freática ejerce un amplio grado de control sobre la estabilidad del dique, bajo ambas condiciones de carga estática y sísmica (Vick 1990). El principal precepto de diseño es que la superficie freática no debe emerger del dique y debe ser lo más baja posible cerca de la cara del dique (Vick 1990). Esto básicamente mantiene una presión de pozo en la cara del dique, inferior a la presión atmosférica más el peso de las partículas del dique y mantiene la cara de la presa. Así, los factores que podrían afectar la superficie freática en el dique también pueden afectar la estabilidad del dique. El método principal para mantener una baja superficie freática cerca de la cara del dique es incrementar la permeabilidad relativa (o conductividad hidráulica, ya que el agua es el fluido) del dique en la dirección del flujo. (Ver Figura 7.)

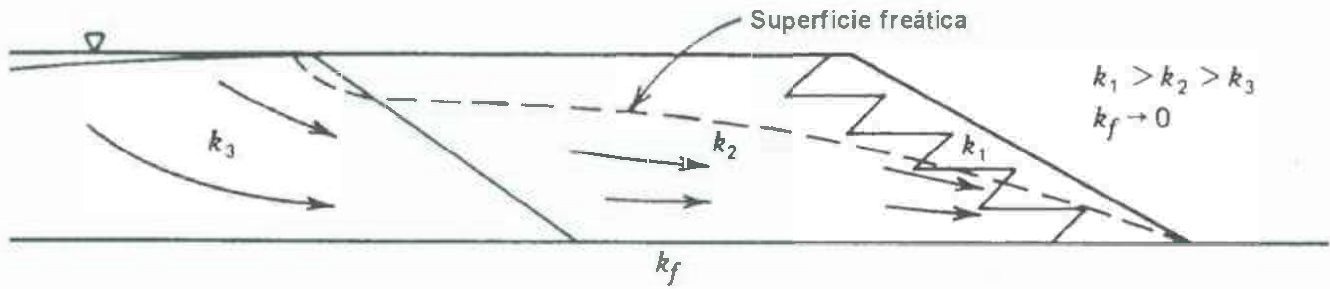


Figura 7. Superficie Freática a Través del Depósito de Jales

(Fuente: CANMET 1977)

Se puede lograr producir un incremento relativo en la permeabilidad aguas abajo con una de dos maneras, o bien una combinación de ambas: mediante la incorporación de zonas de menor permeabilidad en las áreas aguas arriba del dique (normalmente mediante la construcción de diques con núcleos de baja permeabilidad) y mediante el uso de zonas de mayor permeabilidad aguas abajo (por lo general usando zonas de drenaje interno). La selección de qué técnica utilizar se basa a menudo en la disponibilidad de materiales, tales como núcleos de arcilla y/o arenas limpias para desagües. El uso de núcleos y zonas de drenaje para mantener la estabilidad del dique se analiza con más detalle en una sección posterior. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que grandes cambios en la superficie freática requieren de variaciones en la permeabilidad en zonas adyacentes a ser de dos o más órdenes de magnitud (Vick 1990).

La capa de baja permeabilidad controla generalmente la tasa de flujo total a través del depósito. Esto permite tener mayores capas de permeabilidad situadas aguas abajo de la capa de baja permeabilidad para drenar y evitar el aumento de la presión de poro. La regla en el incremento de la permeabilidad en la dirección del flujo sólo se aplica en las zonas cercanas a la cara del dique; si se utiliza un núcleo de baja permeabilidad en el centro del dique y la permeabilidad aumenta aguas abajo hacia la cara, la permeabilidad del material en el lado de aguas arriba del dique puede tener poco efecto sobre la superficie freática aguas abajo del núcleo de baja permeabilidad (Vick 1990).

En la mayoría de los diques, los materiales en las diversas zonas también se disponen para cumplir con los requisitos de filtrado, los cuales son diseñados para evitar la migración de los jales y materiales más finos en las zonas más gruesas. De lo contrario se producirían vacíos que pueden formar una vía a través de la presa a lo largo de la cual el agua puede escapar. Como las tasas de filtración se aceleran a lo largo de la vía, se produce la erosión en el material de la presa y esto conduce a la insuficiencia de la presa. Tales fallas se conocen como fallas por tubificación, debido a la "tubería" natural que se forma a través del dique. Las fallas por tubificación se pueden evitar mediante la correcta aplicación de diversas reglas de filtrado que se han establecido en el diseño de presas de retención de agua. (Vick 1990)



Los factores que afectan a la superficie freática en el dique afectan su estabilidad. Estos factores incluyen las características de deposición de los jales (permeabilidad, compresibilidad, clasificación, densidad de la pulpa, etc.) y las características específicas del sitio, tales como las características de cimentación, la hidrología y la hidrogeología de la zona del depósito y su área de captación aguas arriba. Los cambios en la superficie freática en un dique de jales van a cambiar las presiones de agua de poro y en consecuencia, la resistencia de los materiales de la presa al deslizamiento. Los cambios en la superficie freática pueden ser causados por: mal funcionamiento de los sistemas de drenaje, la congelación de las capas superficiales en el talud aguas abajo de la presa, los cambios en el método de construcción (incluyendo las características del material colocado) y los cambios en la elevación del estanque. El nivel de la capa freática también puede ser alterado por los cambios en la permeabilidad del material de los cimientos subyacentes; a veces éstos son causados por esfuerzos inducidos por la subsidencia minera (Vick 1990).

Además de mantener la superficie freática con fines de estabilidad, el diseño de la presa ahora incluye factores relacionados a los impactos ambientales asociados a las filtraciones de jales. Mediante el uso de revestimientos, desagües y sistemas de rebombeo, la filtración de los jales puede ser controlada. Estas técnicas se analizan con más detalle en una sección posterior de este informe. El diseño también debe abordar la recuperación futura del sitio.

## **3.2 Variables de Diseño**

### **3.2.1 Factores Específicos de jales**

La composición de los jales, densidad de la pulpa, clasificación, y otras características se utilizan en el diseño de los depósitos de jales de tres formas básicas: análisis de jales para evaluar el uso potencial de arenas de jales en la construcción del dique, el análisis de los jales que se colocaran en el depósito para determinar su impacto potencial en la estabilidad estructural y las características de filtración, y análisis mineralógicos para determinar los aspectos químicos potenciales de filtraciones u otras descargas al depósito. Además de las características físicas, el método de deposición de jales en el depósito juega un papel en las "características de ingeniería." (Vick 1990)

Las arenas de jales se utilizan a menudo como una fuente económica de material para la construcción de diques; removiendo las arenas para la construcción del dique, el volumen de jales a ser dispuestos se reduce. Dependiendo de la granulometría (distribución del tamaño de grano) de los jales, un ciclón puede ser usado para separar cantidades suficientes de arena gruesa de todos los jales para construir el dique, dejando un porcentaje más alto de lodos para ser depositado detrás del dique. Las arenas cicloneadas pueden tener a la vez alta resistencia efectiva y alta permeabilidad, las dos principales características necesarias para el material del dique aguas abajo. Adicionalmente, los resultados del ciclonado en el depósito de lodos menos permeables detrás del dique, posibilita la reducción de filtraciones en el depósito.

En cuanto a sus propiedades físicas generales, los jales son considerados como los suelos, sujetos a patrones de comportamiento tradicionales de mecánica de suelos. Las propiedades de índice (gradación, gravedad específica y plasticidad) se determinan mediante pruebas relativamente simples que se pueden realizar en los jales producidos en las pruebas de banco del proceso de la planta. Estas pruebas de índice son una guía de las propiedades de ingeniería de los jales. Se debe tener precaución, sin embargo, ya que los jales difieren en formas sutiles de suelos que tienen propiedades índice similares (Vick 1990).

Las propiedades de los jales que impactan en el diseño, estabilidad y drenaje del depósito incluyen la densidad absoluta y relativa, permeabilidad, plasticidad, compresibilidad, consolidación, resistencia al corte y parámetros de carga (Vick 1990). La densidad absoluta es un factor importante en la determinación del tamaño del depósito requerido para una operación específica, mientras que la densidad relativa influye en el comportamiento de la resistencia dinámica. La densidad absoluta se refiere a la masa/ unidad de volumen de una muestra no alterada de material en el que el volumen de la muestra es mucho mayor que el tamaño medio de partícula. La gradación es un factor de la densidad absoluta, con materiales bien clasificados que tienen normalmente una densidad mayor (CANMET 1977). La permeabilidad (o conductividad hidráulica) de jales in-situ del depósito de jales varía en ambas direcciones horizontal y vertical debido a la forma en capas en que la mayoría de los jales son depositados. La plasticidad se refiere de manera general a la cantidad de arcilla presente. Más específicamente, el índice de plasticidad es el rango de contenido de humedad sobre el cual un suelo es plástico; numéricamente, es la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico del suelo. Los jales con un alto índice de plasticidad son de grano más fino y tienen baja permeabilidad y características de drenado, mientras que los jales con un bajo (o nulo) Índice de Plasticidad son más gruesos y tienen propiedades de drenado de alta permeabilidad. La consolidación y la compresibilidad están relacionadas con el tamaño de las partículas (arenas vs lodos) y la densidad o la relación de vacíos. Estos son una medida del cambio en el volumen total de los jales que se puede experimentar en el tiempo con la deshidratación y/o la carga añadida. Las arenas y limos de jales, por ejemplo, son más compresibles que otros suelos similares. Las resistencias al cizallamiento y parámetros de esfuerzo de los jales son funciones que afectan la estabilidad y se ven afectados por la presión de poro. La interacción de todos estos factores es compleja y afecta a la superficie freática en el depósito y el dique. Para más información, consulte Vick 1990; y CANMET 1977.

Además de las características de los jales que afectan a la estabilidad y la cantidad de filtración, los jales pueden ser analizados para determinar la calidad del agua de filtración. Aparte de los productos químicos de proceso (por ejemplo, cianuro) que pueden estar presentes, los jales de minería metálica pueden contener una gran variedad de minerales originalmente presentes en la roca huésped que pueden contaminar la filtración de jales. Los contaminantes incluyen arsénico, cobre, plomo, manganeso, selenio y otros metales. Los jales también pueden tener niveles significativos de radioactividad.

Los jales y efluentes pueden ser ácidos o cáusticos, y en algunos casos son neutrales, pero más tarde se convierten en ácidos. La oxidación de sulfuros, en particular pirita ( $\text{FeS}$ ) y pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ :  $\text{Fe}_6\text{S}_7$  a  $\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$ ) puede dar como resultado la generación de drenaje ácido. En presencia de oxígeno libre, la pirita se oxida para producir condiciones ácidas. La reacción química es una combinación de sulfuro metálico y agua para producir un hidróxido metálico y ácido sulfúrico. Además de la oxidación química, una bacteria (*Thiobacillus ferrooxidans*) provoca la oxidación bacteriana que puede convertirse en el proceso dominante en las etapas posteriores de la producción de ácido. La acidificación de estanques de jales puede ocurrir en los jales que eran inicialmente alcalinos; mientras los niveles de agua bajan en el depósito de jales, introducen aire en los espacios vacíos y la posterior oxidación produce ácidos. El análisis de la mena y los jales antes de su disposición es útil para anticipar problemas de calidad del agua y la necesidad de ajustar los flujos de filtración. La gestión del agua, su destino asociado y el transporte de contaminantes se tratarán en una sección posterior.

### 3.2.2 Factores Específicos del Sitio

Los factores específicos del sitio juegan un papel importante en el diseño de un depósito. Las consideraciones para el sitio incluyen: (1) las consideraciones físicas, tales como el volumen de jales y el área requerida por la presa, (2) las consideraciones financieras, tales como la cantidad y el costo del material de relleno, controles de agua y métodos de deposición de jales, y (3) los requisitos ambientales tales como el control de inundaciones, contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales, y hábitats de vida silvestre.

El proceso para seleccionar el sitio más favorable es normalmente un proceso de selección en el que los sitios menos adecuados son eliminados sucesivamente de consideraciones futuras. Los criterios de selección incluyen el costo, restricciones de diseño y condiciones ambientales/desempeño; la importancia de cada uno de los criterios puede variar dependiendo de la operación y el sitio donde se proyectará. En la selección de un sitio apropiado, las restricciones son impuestas principalmente por la ubicación de la planta, topografía, hidrología, geología e hidrogeología (Vick 1990). La consideración de todos los factores potenciales y la investigación completa del posible emplazamiento puede disminuir los problemas de diseño una vez que un sitio ha sido seleccionado. Debido a que los factores de diseño también influyen en la selección del sitio, puede resultar más favorable seleccionar el sitio con un proceso dinámico iterativo.

#### Ubicación de la planta

Los jales son generalmente transportados desde la planta en forma de lodos, por lo general con un contenido de sólidos de 15 a 55 por ciento en peso. Esto requiere un sistema extenso de tuberías para los jales, así como para el bombeo de vuelta a la planta del agua recuperada. Vick (1990) cita un costo promedio alrededor de \$ 300,000 dólares/kilómetro para estos sistemas. En consecuencia, los sitios cercanos a la planta son favorecidos en base al costo sobre aquellos más lejanos. La selección inicial

del sitio considera generalmente los sitios dentro de unos 8 kilómetros alrededor de la planta; esta distancia podrá ampliarse más adelante si no se encuentran los sitios adecuados. Lo ideal es que los sitios estén ubicados cuesta abajo de la planta para permitir el flujo por gravedad de los jales al depósito y minimizar los costos de bombeo de lodos; sin embargo, se evitan en lo posible las tuberías con pendientes pronunciadas. Los sitios que tienen poca elevación respecto de la planta al depósito no se pueden descartar.

### Topografía

Además de la distancia y la elevación, la topografía natural es una de las principales consideraciones para el volumen de disposición requerido. El objetivo es conseguir la máxima capacidad de almacenamiento con la menor cantidad de relleno del dique. Los valles naturales y otras depresiones topográficas suelen ser estudiados(as) primero. Como regla general, las alturas del dique se mantienen por debajo de 60 metros. Los diques altos (de más de 120 metros) suelen plantear problemas de diseño y construcción que podrían evitarse con una mejor ubicación. (Vick 1990) La topografía es también un factor importante en la hidrología del sitio.

### Hidrología

Los factores de hidrología del agua superficial generalmente favorecen la desviación del agua alrededor del depósito y a minimizar el ingreso de agua en el depósito (a menos que uno de los objetivos sea recoger el agua para la operación de la planta). En general, estos flujos se reducen al mínimo tanto para condiciones normales e inundaciones. Si es posible, esto se consigue mediante la localización del depósito lo más cerca posible de la cabecera de la cuenca de drenaje para minimizar los costos de construcción de las estructuras de desviación de aguas superficiales. Con el fin de evitar el requerimiento de manipulación excesiva de agua, la superficie total de captación debe ser de 5 a 10 veces inferior a la superficie del depósito (Vick 1990). Aun así, debe haber medidas para controlar el ingreso y el escurrimiento después de que el depósito es "cerrado".

Debido a que la ubicación, la topografía, las consideraciones y limitaciones hidrológicas son factores evaluados con relativa facilidad, éstos asumen gran importancia en el proceso de selección. A medida que las investigaciones del sitio avanzan (y son necesarias las investigaciones más costosas), puede ser apropiado volver a examinar algunos sitios que hayan sido eliminados previamente al principio del proceso.

### Geología y Agua Subterránea

Una vez se han proyectado los criterios del sitio para la ubicación de la planta, la topografía y la hidrología, el número de alternativas de ubicación por lo general se ha reducido considerablemente. Las consideraciones geológicas entonces asumen un papel fundamental. En particular, la geología del sitio afecta a los cimientos del dique, a las tasas de filtración y a la disponibilidad de acarreo de

conocer la resistencia al corte a lo largo de los estratos débiles, así como la permeabilidad y la fuerza de los diversos estratos.

Estas pruebas se realizan generalmente en combinación con ensayos in-situ como la penetración estándar, cono estático, veleta de corte y medidor de presión, con el fin de obtener datos útiles sobre las propiedades de campo. Mientras que las estimaciones de la permeabilidad del suelo se pueden determinar en el laboratorio, esos valores deben ser confirmados mediante pruebas de campo, que pueden incluir métodos de perforaciones in-situ y métodos de bombeo a gran escala. Además, las mediciones de agua subterránea, incluyendo las presiones en las rocas del suelo/arena subyacente y el muestreo del agua, a menudo se realizan para establecer una base de referencia de las condiciones previas a la construcción del depósito.

### Cimentaciones

El área de cimentación debajo del dique se evaluó mediante la geotecnia y otros métodos mencionados anteriormente. El material débil debajo de las cuestas, tal como de laderas enterradas, una vez expuestas a la intemperie, el cubrimiento por la nieve de las superficies sobre las que el material adicional se ha depositado, las capas de material fino incluidas en un dique de material grueso y estratos de cimientos de baja resistencia al corte, pueden causar deslizamiento rotacional. Si un depósito de arcilla está ampliamente agrietado, el agua que penetra en las grietas puede debilitar seriamente el depósito debido a la dependencia de la resistencia al corte del material ablandado adyacente a las grietas. La compresión o consolidación de los cimientos pueden causar un asentamiento considerable del material suprayacente, causando a veces grietas en diques de jales (o zonas de diques) que pueden conducir a la infiltración o la tubificación.

La permeabilidad de la cimentación afecta significativamente la estabilidad de un dique. Cuando un dique se construye sobre una cimentación de arcilla impermeable saturada, por ejemplo, la carga del dique creará exceso de presión de poro en el material de cimentación. Debido a que la carga inmediata es tomada por la fase de agua en el material de cimentación, no hay un aumento en la resistencia al corte y el rápido aumento de la carga puede desencadenar fallos en el dique que se extienden a través de la cimentación. Si el material de cimentación por debajo de la presa de jales es permeable, la filtración excesiva puede conducir a la falla por tubificación. Todos estos factores de la cimentación se tienen en cuenta durante el diseño.

### Sismicidad

El diseño de los depósitos de jales por lo general tiene que considerar el potencial de actividad sísmica del sitio. Esto requiere la selección de un diseño sísmico del sitio en cuestión. Un método usado comúnmente para determinar los efectos de un diseño sísmico en un sitio en particular es asumir que el terremoto se produce en la falla conocida posiblemente activa más cercana. La falla se selecciona

basándose en los estudios geológicos realizados previamente en el área. Las tablas de atenuación se utilizan entonces para estimar la magnitud de las fuerzas sísmicas que llegan al sitio obteniendo como resultado una predicción del sismo que ocurre en la falla seleccionada.

#### **4. CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE, ESTABILIDAD Y FALLA**

##### **4.1 Construcción del dique**

Las investigaciones de diseño de diques de jales, descritas anteriormente, conducen a la selección y el refinamiento de una presa de arranque que servirá como punto de partida para la construcción de diques. El diseño de la presa de arranque especifica la geometría interna y externa de la estructura, y debe incluir especificaciones para el drenaje, el control de filtraciones y en algunos casos los sistemas de revestimiento necesarios para mantener la estabilidad del dique y el control de las descargas al medio ambiente. Es importante destacar que el diseño final del dique puede diferir sustancialmente de las expectativas iniciales. Si la construcción del dique continúa durante toda la vida activa del depósito, la experiencia adquirida con el monitoreo y análisis continuo permitirá cambios y mejoras en el diseño para cumplir mejor con los objetivos del proyecto.

En general, si el diseño de la presa de arranque incluye revestimientos y/o sistemas de drenaje, tales sistemas deben desarrollarse antes o simultáneamente con la construcción inicial de la presa, así como con cada levantamiento sucesivo del dique. Las consideraciones ambientales pueden crear la necesidad de revestimientos dado que los jales pueden tener un potencial para lixiviar componentes tóxicos o indeseables a estratos subyacentes; de manera similar, es conveniente limitar el flujo de aguas subterráneas poco profundas hacia los jales. Los revestimientos pueden estar compuestos de suelos nativos compactados, lodos de jales compactados, arcillas importadas o locales, materiales sintéticos, gunita, etc. Por motivos económicos, la compactación de suelos nativos o de lodos de jales son los métodos preferidos para la reducción de la permeabilidad en la cimentación del depósito con los cuales se cumplen los objetivos. Además, como una cuestión práctica, algunos diseños de depósitos, tales como los depósitos transversales al valle, pueden no ser susceptibles a cualquier otro tipo de revestimiento; ya que con áreas de superficie muy grandes y terreno irregular, el uso de revestimientos sintéticos u otros materiales importados es en general sumamente costoso para este tipo de depósito, incluso si es técnicamente factible.

Pueden ser necesarios los sistemas de drenaje por razones estructurales. Como se mencionó anteriormente, una preocupación primaria sobre el uso de jales para la construcción del dique es el control de la presión de poro dentro y por debajo del dique. El exceso de presión de poro dentro del dique puede conducir a sobrepasar la resistencia total del material de relleno, lo que resulta en una falla de pendiente local o general. Adicionalmente, las altas presiones de poro dentro o debajo de la cara del dique pueden dar lugar a una filtración descontrolada en la superficie de la presa que lleva a

una falla de tubificación (comentado más adelante). Del mismo modo, la filtración a través de las capas permeables débiles de la cimentación puede dar lugar a la tubificación o a superar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, provocando el hundimiento de la cimentación y comprometiendo la estabilidad del dique suprayacente. Estas y otras amenazas a la estabilidad del dique se pueden reducir parcialmente a través del control de filtraciones. En términos generales, el control de las filtraciones puede verse influido mediante el establecimiento de zonas de diferente permeabilidad aguas arriba, debajo y dentro del dique, ya sea a través de sistemas de drenaje, capas de baja permeabilidad o de núcleos, o ambos.

La función principal de los sistemas de drenaje es la disipación de la presión de poro a través del dique. Los sistemas de drenaje permiten el control de la superficie freática al proveer conductos de baja presión para la filtración. Varios métodos están disponibles para lograr este objetivo. En particular, las chimeneas y mantas de drenaje, cada uno compuesto de materiales de permeabilidad de al menos dos órdenes de magnitud mayores que la del relleno mismo del dique (Vick 1990), se pueden instalar dentro y debajo del dique para permitir la disipación de la presión de poro. Las chimeneas de drenaje consisten en cortinas verticales hechas de material de alta permeabilidad, mientras que las mantas de drenaje consisten en capas horizontales hechas de un material de alta permeabilidad. Las variaciones de cada uno pueden ser utilizadas dependiendo de los requerimientos de diseño. La localización de cada zona de drenaje depende del método de construcción del dique, lo que se analiza más adelante.

Algo fundamental para el desempeño de los sistemas de drenaje es la prevención de su obstrucción, esto puede ocurrir por ejemplo, cuando los finos de los jales se infiltran en la zona de drenaje. Los filtros o zonas de filtración pueden ser empleados para ayudar a prevenir la obstrucción y por lo tanto mantener las diferencias en la permeabilidad a través de las zonas. Las zonas de filtración pueden ser construidas de arenas graduadas o tejidos filtrantes sintéticos (Vick 1990).

Lo antes expuesto destaca un concepto importante común en los depósitos de jales en general: La filtración a través de los diques de jales es en esencia inevitable y muchas veces necesaria. Puesto que el propósito del dique de jales es almacenar lodos de jales (y permitir la recuperación del agua de proceso de la planta) y dado que las arenas de jales usadas para la construcción del dique nunca son impermeables, la carga hidráulica a través del dique nunca será cero. Un poco de agua migrará a través y/o bajo el dique.

## **4.2 Métodos de Construcción**

Una variedad de métodos y materiales de construcción son utilizados en la construcción de diques de jales. En general, las minas deciden los materiales y métodos para proporcionar la estabilidad necesaria al menor costo. Si la presa de jales está cerca de la mina, el uso de roca estéril puede reducir

significativamente el costo de los materiales, a la vez que reduce la necesidad de áreas de disposición de roca estéril.

Si se utilizarán materiales de préstamo, pueden obtenerse de la zona del depósito y aumentar de esta manera la capacidad del depósito. Los materiales también deben cumplir con los requisitos de permeabilidad, compresibilidad y resistencia al corte. También deben ser químicamente estables, por lo que la roca estéril potencialmente generadora de ácido no es adecuada para la construcción de diques, particularmente en los sistemas de drenaje. El material utilizado con más frecuencia en la construcción de diques es el de los jales.

#### 4.2.1 Construcción Utilizando el Material de Jales

El uso del material de jales es generalmente el método de construcción más económico. Como se mencionó anteriormente, algunas de las desventajas del uso de jales como material para la construcción de presas de jales incluyen: alta susceptibilidad a la tubificación interna, superficies altamente erosionables y la alta susceptibilidad de los jales finos frente a la acción de las heladas. Además, los jales libres y saturados están sujetos a licuefacción bajo conmociones sísmicas. Las dos formas principales para mejorar estas cualidades durante la construcción de la presa de jales son el uso de las fracciones gruesas de los jales y la compactación. Generalmente, las fracciones de arena, después de haber sido separadas de los lodos, pueden ser fáciles de compactar utilizando compactadores vibratorios. Al compactar esta fracción gruesa de los jales, el resultado final es una masa densa de material fuerte que ha aumentado considerablemente su resistencia a la licuefacción. La separación de jales usada más comúnmente se da mediante descarga múltiple o ciclonado. Una comparación de estos métodos se presenta en la tabla 1.



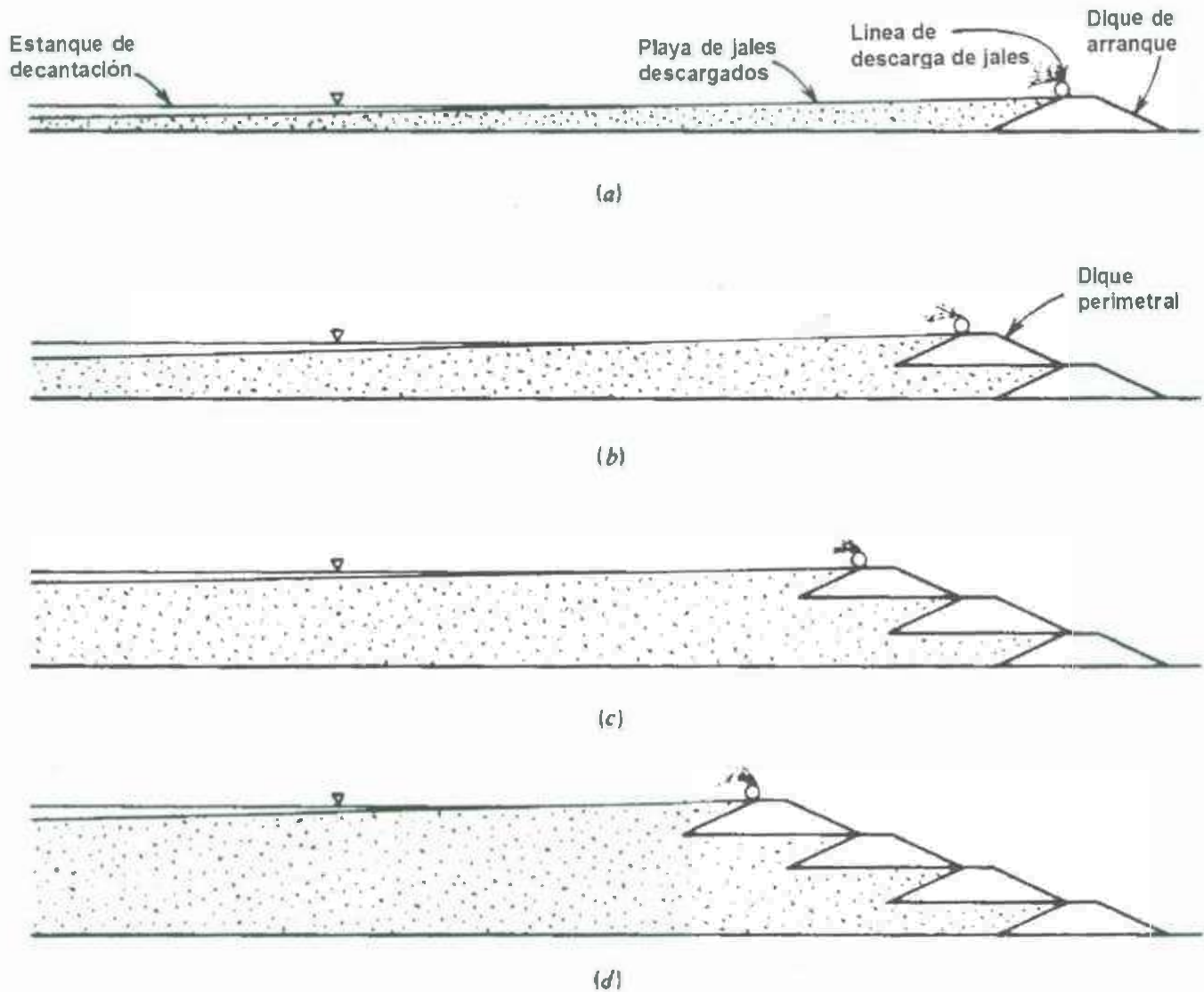


Figura 8. Construcción del Dique Aguas Arriba

(Fuente: Vick 1990)

#### 4.2.2 Método Aguas Arriba

Construcción aguas arriba, es el método más antiguo y económico, comienza con un dique de arranque construido al pie del lado aguas abajo (figura 8). El dique de arranque debe ser capaz de pasar agua de filtración y la parte aguas abajo debe ser resistente a la tubificación. Los jales son descargados en la periferia de la cresta del dique de arranque utilizando espitas o ciclones. Estos depósitos desarrollan un dique y un área extensa de playa compuesta por materiales gruesos. La playa se convierte en la cimentación del siguiente dique. En algunas aplicaciones, los diques se colocan mecánicamente y la descarga se utiliza para construir solamente la playa (además, los jales pueden ser usados para recubrir la cara aguas arriba del dique y reducir la permeabilidad). Estos diques se pueden construir con relleno de préstamo o arenas de jales que pueden ser excavadas de la playa y colocadas por una

dragalina o excavadora. De cualquier manera, algún tipo de compactación mecánica del dique se lleva a cabo normalmente antes de que se construya la siguiente etapa de la presa.

El criterio más importante para la aplicación del método de construcción aguas arriba es que la playa de jales debe formar una base competente para el soporte del siguiente dique. Vick (1990) establece que, como regla general, la descarga no debe contener menos de 40 a 60 por ciento de arenas. Esto puede impedir el uso del método aguas arriba para los jales que contienen porcentajes muy bajos de arena. Otras referencias indican que el factor determinante para decidir entre el método de construcción aguas arriba y el método aguas abajo es la distribución del tamaño de grano de los jales. Además de las pruebas de tamaño de grano, Brawner y cols. (1973), sugirieron que, "si un tractor no puede ser operado en los primeros 30 a 60 metros de la playa, la molienda es demasiado fina para los métodos de construcción aguas arriba".

Además de la gradación de los jales, existen otros factores que pueden limitar la aplicación de este método. Estos factores incluyen el control de la superficie freática, la capacidad de almacenamiento de agua, la susceptibilidad a licuefacción sísmica y la tasa de elevación de la presa. La construcción de diques aguas arriba ofrece pocas medidas estructurales para el control de la superficie freática en el dique. Vick (1990) identificó cuatro factores importantes que influyen en la ubicación de la superficie freática: permeabilidad de la cimentación en relación con los jales, el grado de segregación del tamaño de grano, la variación de la permeabilidad lateral dentro del depósito y la ubicación del agua estancada en relación con la cresta del dique. Solo la ubicación del estanque puede ser controlada a través de prácticas operacionales. Los otros factores deben ser planificados en la fase de diseño de la construcción. Ambos procedimientos como lo son la decantación y la descarga múltiple pueden ser utilizados para controlar la distancia entre el borde del depósito y la cresta del dique. Aunque la ubicación del depósito puede ser controlada en cierta medida durante el funcionamiento, un depósito de jales que se espera reciba altas tasas de acumulación de agua (debido a las condiciones climáticas y topográficas) debe ser construido utilizando un método diferente al de construcción aguas arriba. Cualquier cambio en las condiciones ambientales u operacionales (fuertes lluvias, bloqueo de los medios de filtración, elevación de los niveles de agua en el depósito, etc.) dará como resultado un aumento de la línea freática y la saturación completa de la capa exterior de arena y podría provocar una falla por tubificación o deslizamiento. Una capa exterior de escollera podría mitigar la falla potencial por tubificación o deslizamiento.

Los diques de jales construidos utilizando el método aguas arriba, generalmente tienen una baja densidad relativa con una alta saturación de agua. Esta combinación puede resultar en licuefacción del dique de jales en caso de actividad sísmica. Además, una vibración de intensidad y magnitud suficientes causada por explosiones, trenes, camiones pesados, etc., pueden causar también la licuefacción. La resistencia al corte se puede reducir a cerca de cero, de tal forma que los lodos fluidizados fácilmente irrumpen a través de la delgada e insaturada capa restante de arena del dique y

por los colapsos y corrientes de la presa. Esto puede ocurrir a alturas muy bajas y ángulos de pendiente bajos. Por lo tanto, la construcción aguas arriba no es apropiada en áreas con un potencial de alta actividad sísmica.

La tasa de elevaciones del dique está limitada por la acumulación en exceso de presión de poro dentro del depósito. Esta acumulación de presiones de poros puede llevar a una falla por cortante, lo que puede resultar en una ruptura de la presa y posterior liberación de los jales contenidos en ella (Brawner 1973). La altura en la que se desencadenan las posibles fallas depende de la fuerza de los jales dentro de la zona de cizallamiento, la pendiente aguas abajo de la presa y la ubicación de la línea freática.

Las zonas de drenaje horizontales pueden ser instaladas durante la construcción del dique de arranque para ayudar a mantener baja la presión de poro en el dique. Vick (1990) afirma que un drenaje tipo manta bien extendido aguas arriba del dique de arranque puede ser eficaz en la reducción de la superficie freática en las elevaciones iniciales y posteriores del dique.

#### 4.2.3 Método Aguas Abajo

Los requerimientos de diseño para el método de construcción aguas abajo son similares a los de las presas de almacenamiento de agua convencionales. Como en la construcción aguas arriba, la construcción aguas abajo también comienza con un dique de arranque construido de materiales de préstamo compactados, sin embargo, esta presa de arranque puede estar construida de arenas y gravas permeables, o predominantemente de limos y arcillas para reducir al mínimo la filtración a través de la presa (Figura 9). Si se utilizan materiales de baja permeabilidad en el dique de arranque, los drenajes internos necesitarán ser incorporados en el diseño. El método aguas abajo es llamado así porque las etapas posteriores a la construcción del dique se apoyan en la parte superior del talud aguas debajo de la sección construida anteriormente, cambiando la línea central de la parte superior de la presa a la parte aguas abajo conforme se van elevando progresivamente las etapas de la presa.

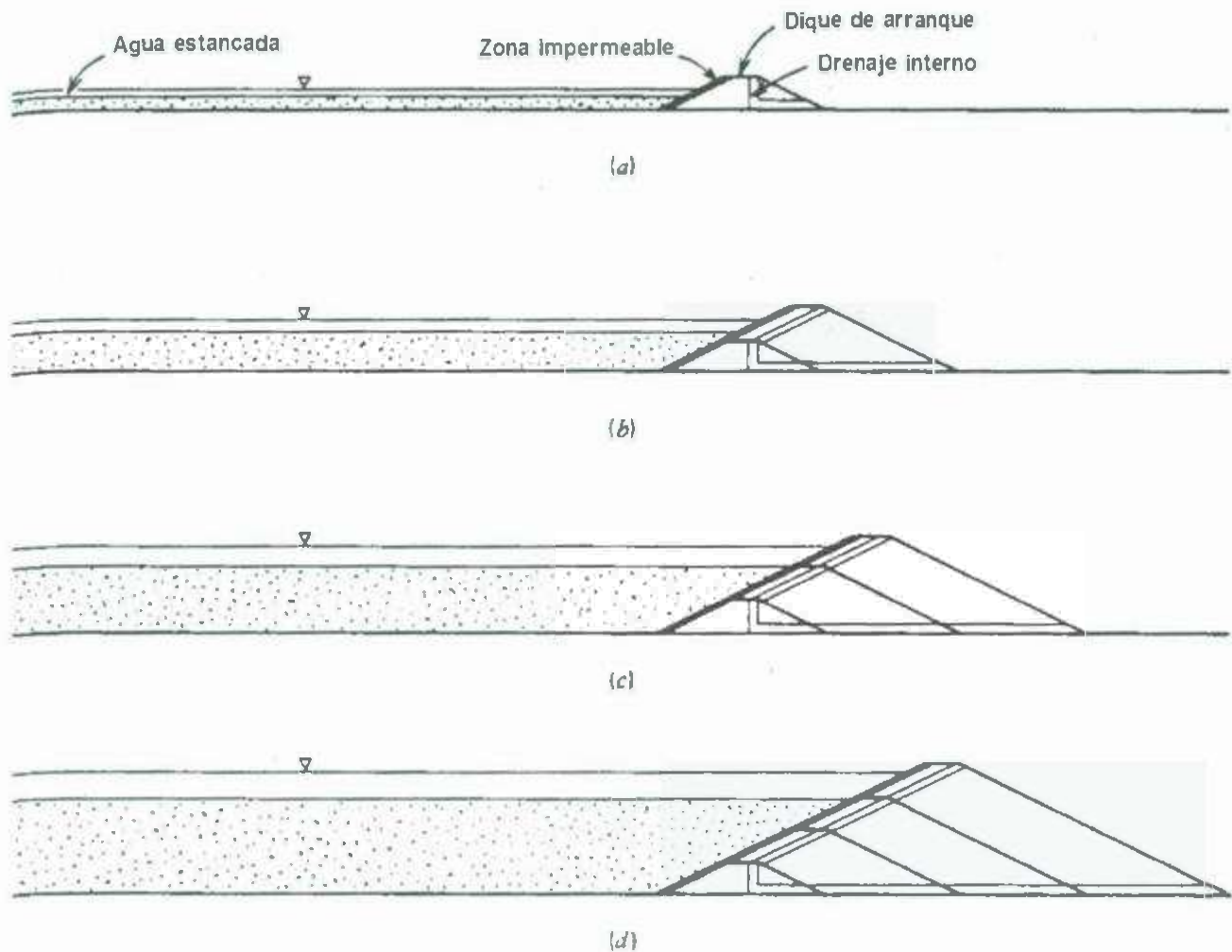


Figura 9. Construcción del Dique Aguas Abajo

(Fuente: Vick 1990)

Una variedad de técnicas de disposición de jales pueden ser utilizadas en conjunción con el método de construcción aguas abajo, sin embargo la descarga múltiple periférica de jales es muy común. Los jales gruesos pueden propagarse en capas delgadas utilizando ciclones sobre la presa, o pueden ser transportados de una pila de acopio central de jales gruesos, después se extienden y compactan. Si el volumen de jales gruesos no es suficiente para construir la presa, se pueden incorporar materiales locales de préstamo para una parte de la estructura. Si se utiliza roca gruesa, debido a su porosidad, se requiere un filtro o membrana impermeable para evitar la tubificación de los jales a través de la roca. Si la descarga múltiple es controlada para crear una playa amplia de jales y el dique se ha hecho de jales permeables, la superficie freática puede ser controlada sin la necesidad de zonas o desagües impermeables internos. Sin embargo, Brawner, y cols. (1973) recomienda que si la presa se construirá en una zona de terremotos potenciales y/o su altura excederá los 15 metros, las extensiones aguas abajo deben ser compactadas a una densidad relativa mayor lo que es típico para minimizar el riesgo de licuefacción.

El método de construcción aguas abajo permite la incorporación de drenajes y núcleos impermeables para controlar la superficie freática. Brawner, y cols. (1973) recomienda la colocación de una capa de drenaje inferior de arena permeable o sistema de drenaje alternativo antes de cada extensión aguas abajo. Varios otros diseños de drenaje también se pueden incorporar en el diseño. Por ejemplo, un desagüe tipo chimenea inclinada cerca de la cara aguas arriba del dique, y conectada a un desagüe tipo manta en la base del dique, pueden instalarse con cada aumento sucesivo del dique. (Vick 1990). Los controles de drenaje ayudan a controlar la superficie freática y reducir al mínimo la posibilidad de acumulación de presiones de poros que reducen la resistencia al corte. Debido a la capacidad de incorporar desagües en el diseño, este método de construcción se adapta bien a las condiciones en que grandes volúmenes de agua pueden ser almacenados junto a los sólidos de jales.

El método de construcción aguas abajo ofrece un grado de estabilidad que no se encuentra en la construcción aguas arriba debido a la capacidad y facilidad de compactación, la incorporación de medidas de control de la superficie freática y el hecho de que las elevaciones de la presa no dependen estructuralmente de los jales depositados sobre la cimentación. Una desventaja importante de este método es el gran volumen de material de relleno requerido para elevar la presa. El aumento del volumen de relleno requerido puede incrementar drásticamente el precio de este método de construcción si los jales de la planta no pueden proporcionar un volumen suficiente de arena. Los diques construidos con elevaciones aguas abajo también cubren un área relativamente grande, lo que puede ser una gran desventaja si el espacio disponible es limitado.

#### 4.2.4 Método de Línea Central

El método de línea central es similar tanto al método de construcción aguas arriba como el método aguas abajo en que el dique comienza con un dique de arranque y los jales son descargados desde la cresta de la presa hacia la playa. La línea central del dique se mantiene como relleno y los aumentos progresivos se colocan tanto en la cara aguas arriba (playa) como en la cara aguas abajo (Figura 10). Los jales ubicados en la pendiente aguas abajo deben ser compactados para evitar el fallo por cizallamiento. El método de construcción de línea central proporciona algunas de las ventajas con respecto a los otros dos métodos al mismo tiempo que mitiga algunos de sus inconvenientes.

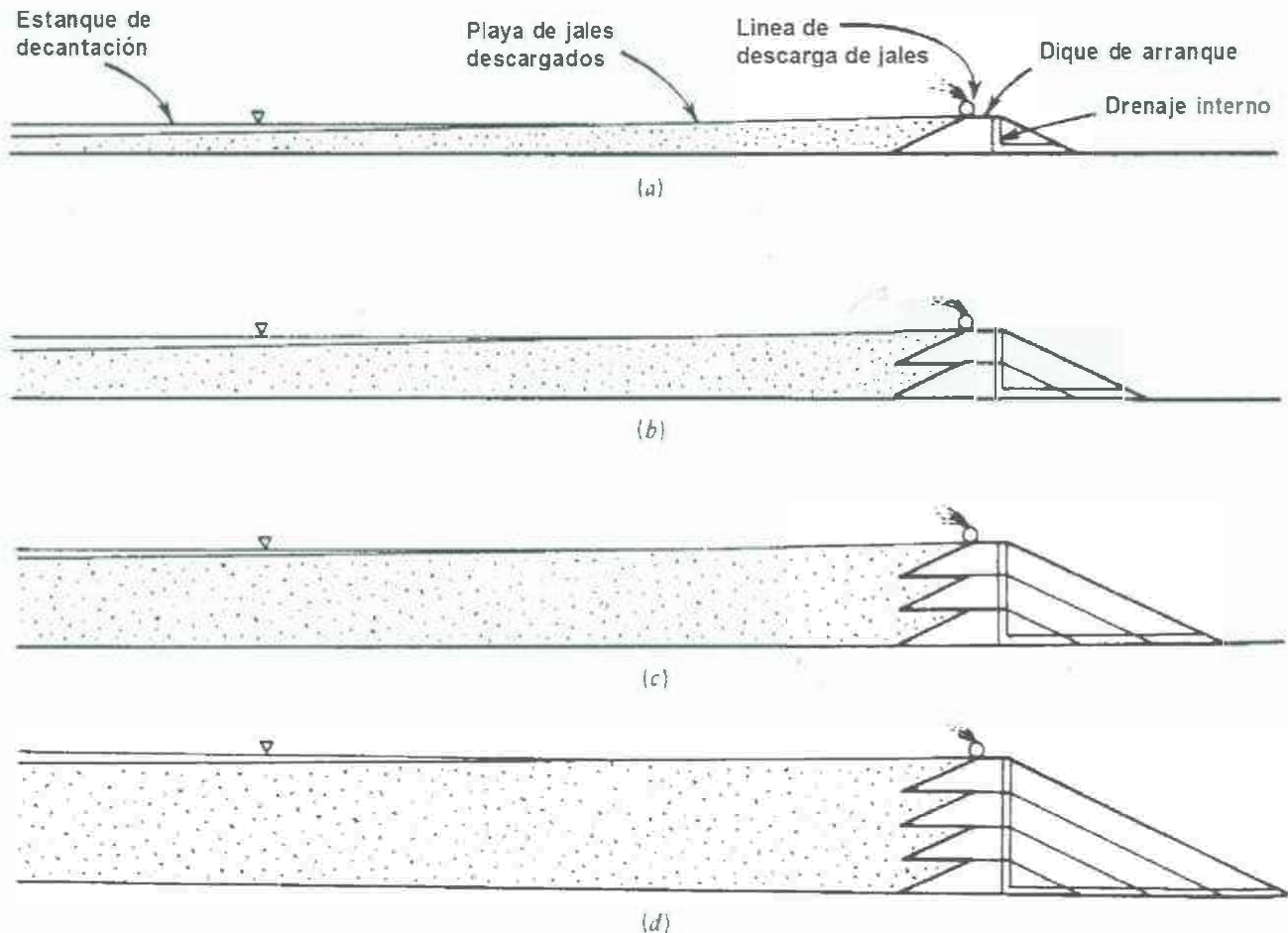


Figura 10. Construcción del Dique Tipo Línea Central

(Fuente: Vick 1990)

Al igual que en el método aguas abajo, las zonas de drenaje pueden ser incorporadas en la construcción. Una amplia playa no es obligatoria y este método es susceptible para su uso con jales que contienen relativamente un bajo porcentaje de arena. Puesto que se requiere menos arena, los aumentos de la presa pueden añadirse más rápido que en los métodos aguas arriba o aguas abajo. La gradación gruesa de los jales es necesaria si se requiere un drenaje rápido para proporcionar apoyo a los equipos de construcción.

Aunque este tipo de dique no es susceptible de almacenar permanentemente grandes volúmenes de agua, el almacenamiento a corto plazo del agua debido a fuertes precipitaciones o el cerrado de la planta no afectará negativamente la estabilidad de la presa.

Si el dique se ha compactado adecuadamente y proporciona un buen drenaje interno, este tipo de dique es resistente a actividades sísmicas. Incluso en el caso de que los lodos colocados junto al talud aguas arriba se licuen, las porciones centrales y aguas debajo de la presa pueden permanecer estables debido a sus buenas características de compactación y drenaje.

#### 4.2.5 Diques Construidos Utilizando Materiales Alternativos

Aunque los tres métodos de construcción mencionados anteriormente son típicamente construidos con grandes volúmenes de jales gruesos, porciones de las presas (particularmente el dique de arranque) pueden incorporar una variedad de materiales de relleno de préstamo. Por ejemplo, la roca estéril y el desmonte del recubrimiento durante la extracción a cielo abierto pueden ser utilizados para la construcción del dique. Sin embargo, los residuos retirados de la mina no pueden seguir el ritmo de demanda para elevar toda la cresta de la presa. Además, la roca estéril que puede ser potencialmente generadora de ácido no es adecuada para la construcción del dique (o drenaje).

En general, cuando se utilizan materiales naturales exclusivamente para la construcción de presas, los diseños de presas estándar de tierra (de retención de agua) pueden seguirse. Una presa de retención de agua construida con materiales nativos debe contener controles internos tales como un núcleo impermeable, zonas de drenaje y filtros apropiados. Estos diseños son los más adecuados cuando se planifica almacenar grandes volúmenes de agua junto con jales. Se requieren cambios en el diseño para tener en cuenta el mayor peso de la unidad de jales saturados. Además, dado que las presas de retención de agua están diseñadas para limitar el drenaje a través del núcleo, la colocación de lodos descargados en la cara aguas arriba usualmente produce un sello moderadamente impermeable aguas arriba.

#### 4.3 Deposición de jales

Generalmente, los lodos de jales se transportan por medio de tuberías desde la planta al depósito de jales para su disposición. Una vez que los jales llegan al depósito, se pueden utilizar una variedad de opciones para depositarlos. Para determinar cuál es el mejor método para una operación en particular, los ingenieros encargados (generalmente ingenieros civiles especializados en la trata de los jales mineros) estudian las características del material, el ciclo de disposición y el clima. También consideran el diseño del depósito y el dique. En el análisis siguiente, se asume que el depósito no es del tipo de retención de agua, y que los jales serán usados para proveer la mayoría del material para la construcción del depósito.

Tres métodos generales de disposición de jales son los reconocidos típicamente: descarga de un punto, descarga múltiple y ciclonado. Hay variaciones sobre todos estos métodos y los métodos pueden ser usados en combinación para lograr el criterio del diseño establecido por los ingenieros.

##### 4.3.1 Descarga en un Punto Único

La descarga de un punto único es la técnica de descarga de jales desde el extremo abierto al final de la tubería de jales. Este método a menudo se emplea en los depósitos que descargan los lodos de jales aguas arriba del estanque y presa (es decir, no de la cresta de la presa). Esta técnica no es apropiada

cuando el estanque (y/o la fracción fina de los jales) debe mantenerse a buena distancia del dique. La descarga de un punto, también se puede usar para descargar lodos dentro de la presa, pero esto requiere que el punto de descarga sea trasladado periódicamente a otra sección de la presa para evitar levantamientos desiguales en las secciones de la presa. Además, la baja relación entre superficie y volumen proporcionada por la descarga de un punto hace que este método sea atractivo en ambientes extremadamente fríos, donde el congelamiento puede ocurrir en flujos más pequeños de descarga (Lighthall 1989).

#### 4.3.2 Descarga Múltiple (Spigotting)

La descarga múltiple es la técnica de descargar jales a través de pequeños tubos (espitas) que se originan en múltiples puntos a intervalos regulares a lo largo de una línea principal (Lighthall 1989). El método se utiliza para lograr un flujo más o menos uniforme de jales, lo cual, en teoría, creará playas uniformes. Sin embargo, la posición de los puntos de descarga puede requerir de rotación para lograr dichas playas uniformes. La descarga múltiple forma una playa con una ligera inclinación en donde las fracciones más gruesas se asientan cerca del punto de descarga y las más finas (lodos) se depositan progresivamente más lejos de los puntos de descarga. Como resultado de esta gradación variable, la densidad, resistencia al corte y permeabilidad de los sólidos asentados decrece con el incremento de distancia del punto de descarga. Como se mencionó anteriormente, esta característica distributiva puede ser muy favorable en la reducción de la superficie freática antes y a lo largo del dique. Sin embargo, las observaciones de distribución de tamaño real de partícula, permeabilidad y resistencia al corte con la distancia del punto de descarga indican que la gradación ideal uniforme teóricamente conseguible, rara vez puede ser lograda en la práctica (Vick 1990, Lighthall 1090). Aun así, la consideración de la velocidad de los jales de cabecera, la concentración de sólidos en las líneas principales y líneas de espitas, así como del punto de descarga (entre otros factores) puede permitir el desarrollo de playas que proveen una estabilidad estructural al dique principal mientras crean un largo camino de filtración (proveyendo disipación consecuente de la presión de poro) desde el estanque al dique en la presa (Lighthall 1989).

#### 4.3.3 Ciclonado

Las arenas de jales (la fracción gruesa de los jales) pueden ser usadas para construir presas de jales durante la deposición activa. Las compañías mineras suelen ver los ahorros de costos como la mayor ventaja de usar la fracción gruesa de este modo. Como la arena es producida del material a ser depositado (los jales), cualquier costo relacionado con adquirir relleno de material de préstamo para la construcción de diques se elimina o reduce significativamente. Esta práctica además reduce el volumen total de los jales a ser colocados en el depósito, dado que al menos parte de la fracción gruesa ha sido utilizada en la construcción de la presa. El método utilizado para separar los finos de las fracciones gruesas en el total de los lodos de jales es el ciclonado.



Los ciclones son simples aparatos mecánicos usados para separar las partículas finas y las gruesas de un lodo a través de la acción centrífuga. Conforme los lodos, moviéndose bajo presión, entran al ciclón, las partículas finas y la mayoría del agua suben a la salida superior. Las partículas gruesas bajan en espiral a través de una sección cónica y salen por debajo. La fracción fina separada es llamada flujo superior y la fracción de arena es llamada flujo inferior. El flujo inferior es el que se utiliza para construir los diques de jales, mientras que el flujo superior se descarga a través de una tubería independiente de limos al depósito en sí. Los flujos superiores e inferiores deben ser monitoreados regularmente para medir la densidad de pulpa, gradación y las presiones de entrada del ciclón. El ajuste de los ciclones se requiere rutinariamente para mantener los objetivos de densidad de pulpa y tamaño de grano adecuados.

Hay ciertos criterios que deben ser considerados cuando se evalúa si el ciclonado puede ser una herramienta efectiva en la construcción de un dique de jales. Las arenas obtenidas deben tener una permeabilidad que sea suficientemente más alta que los lodos colocados en el depósito de tal forma que la superficie freática pueda ser controlada adecuadamente en la presa. Las arenas también deberían permitir el drenado rápido al momento de descarga para facilitar su manejo y esparcimiento. El volumen de las arenas cicloneadas recuperadas del total de los jales debe ser lo suficientemente grande para permitir el levantamiento de la presa y mantener un volumen adecuado en el depósito para lodos. Si el volumen de las arenas cicloneadas cae por debajo del requerido para los levantamientos de las presas, los costos podrían aumentar puesto que se necesitarían tomar materiales prestados para mantener el volumen del depósito adecuado. Los jales que contienen menos del 60 por ciento de partículas pasando la malla 200, generalmente son considerados de calidad de arena aceptable para el uso en ciclonado. El ciclonado en dos etapas, empleando dos ciclones en series, a menudo es empleado para producir una fracción de arena que contiene menos finos que el ciclonado en una sola etapa.

Existen dos métodos básicos de ciclonado que son de uso común para la construcción de presas de jales: el ciclonado central (o ciclonado estacionario) y el ciclonado en presa. Un tercer método, el ciclonado en celda hidráulica es una aplicación más sofisticada que se utiliza con menos frecuencia. El método de ciclonado central establece un solo ciclón permanente o semi-permanente de alta capacidad en una ubicación estratégica, a menudo en una base más elevada que la cresta de la presa proyectada. El flujo inferior del ciclón crea una pila de acopio de arena de jales para su uso en la construcción del dique mientras que el flujo superior del ciclón es descargado al centro del depósito. Los equipos de movimiento de tierras trasladan las arenas de jales de la pila de acopio al dique donde se descargan y se compactan. La colocación y compactación mecánica da lugar a arenas con una alta densidad relativa. Por lo tanto, el método es muy adecuado para su uso en áreas susceptibles a actividad sísmica.

El sistema de ciclonado en presa consiste de varias unidades de ciclones colocadas en torres, camiones, andamiajes, o suspendidas de grúas establecidas a lo largo de la cresta de la presa. El número de ciclones es determinado por el tamaño de los ciclones y el rendimiento de la planta. Las

arenas de flujos inferiores de los ciclones son depositadas en el la cara del dique mientras que las de flujo superior se descargan al depósito. La alta densidad de la pulpa en el flujo inferior (típicamente de 70 a 75 por ciento sólidos) da como resultado la deposición de pilas de arena inclinadas con una pendiente de 3:1 o 4:1 (horizontal:vertical) en el talud del dique que está en construcción. Los ciclones son movidos conforme los conos de arena elevan la altura del dique. Normalmente el grado de la arena colocada por los ciclones no varía con la distancia del punto de descarga. Sin embargo, puede variar entre sitios: Lighthall, y cols. (1989) reportó que si se usan altas densidades de pulpa de flujo inferior los operadores de jales pueden en ocasiones bajar la densidad de la pulpa del flujo inferior para lavar los conos en vez de mover los ciclones con demasiada frecuencia. Esta práctica podría resultar en no lograr el objetivo de tamaño de grano para la cara del dique.

El sistema de ciclonado en presa es eficiente en cuanto a costos porque las arenas son colocadas hidráulicamente en su lugar final y no es necesaria la acción mecánica. Una desventaja de este método es que el colocado no-mecánico resulta en densidades relativamente más bajas, rondando generalmente del 30 por ciento al 68 por ciento, como se informa en Lighthall, y cols. (1989). Aunque las densidades relativas entre 45 y 50 por ciento, pueden ser logradas normalmente, las densidades relativas por debajo de 30 por ciento no son infrecuentes. Estas bajas densidades relativas pueden eliminar el uso de este método de deposición en áreas de alta actividad sísmica.

El método de la celda hidráulica deposita los flujos inferiores diluidos del ciclón (es decir, arenas) en celdas bermeadas sobre un dique de jales. Los jales son cicloneados en un ciclón central y el agua es agregada al flujo inferior para facilitar el transporte en tuberías a las celdas en el dique. Los sólidos en las celdas se dejan sedimentar antes de que el exceso de agua sea decantada desde el extremo de la celda opuesta al punto de descarga. Algunas minas usan tractores de orugas para compactar las arenas en las celdas durante la deposición. Lighthall, y cols. (1989) y Mittal y Hardy (1977) indican que las densidades relativas de más de 60 por ciento se pueden conseguir con el método de la celda hidráulica y la compactación mecánica. Sin compactación mecánica, Lighthall, y cols. (1989) y Mittal y Morgenstern (1977) informan que las densidades relativas de los jales por encima de 50 por ciento se pueden conseguir.

Una ventaja importante del método en celdas hidráulicas es el logro de densidades relativamente altas usando deposición hidráulica directa (y posiblemente compactación mecánica). El método presenta limitaciones para su uso en diques estrechos puesto que un área de depósito relativamente amplia y plana es requerida para la construcción de las celdas. Además, los finos deben limitarse a 5 o 10 por ciento en el flujo inferior del ciclón para lograr arenas con alta permeabilidad que permitan el drenado rápido del agua en la celda. Esta limitación de los componentes finos en el flujo inferior puede resultar en una reducción en la recuperación total de arenas y, por lo tanto, la reducción en la cantidad de arena disponible para la construcción de la presa.

#### 4.4 Análisis de Estabilidad

Desde el diseño inicial del depósito de prueba hasta el cierre final del sitio, la estabilidad de la presa de jales sigue siendo un aspecto importante. El principal objetivo del ingeniero del depósito es desarrollar una estructura de contención de desechos al costo más bajo posible. Las opciones en cuanto a los materiales, ángulos de inclinación, control de desagüe, tasas de elevación, etc., todas afectan al costo, así como a la estabilidad de la estructura. Por lo tanto, el análisis de la estabilidad es realizado para optimizar la estructura con respecto al costo y otros objetivos mientras se conserva la fiabilidad.

Los análisis de estabilidad de taludes comienzan con una estimación de la fiabilidad del depósito de prueba. Normalmente, el diseñador de diques propone la geometría interna y externa del depósito de prueba y luego calcula el factor de seguridad del diseño. Usando información detallada sobre las propiedades físicas del material de relleno y los estimados del volumen de jales y agua a ser contenidos en el depósito, se predice la superficie freática. El diseñador entonces examina un amplio rango de modos de fallo (tratados abajo) para calcular los esfuerzos expresados en superficies de fallo hipotéticas. El factor de seguridad para cada modo de fallo es entonces calculado dividiendo la resistencia estimada del dique a la tensión a lo largo de la superficie de fallo por la carga de la tensión expresada en la superficie de fallo. Con este proceso, el diseñador puede observar cambios en los parámetros del diseño y la influencia resultante del factor de seguridad para llegar a la opción de menor costo en consonancia con los objetivos de seguridad (Inyang 1993).

Una vez que la construcción del depósito ha comenzado, la calidad de la información disponible para el análisis de la estabilidad de taludes mejora. El proceso anterior puede ser repetido para cada levantamiento del depósito, reemplazando los estimados de los niveles de la superficie freática y las propiedades físicas de los materiales de relleno con valores de medición recolectados en el campo (Mittal and Morgenstern 1974). Basado en cálculos adicionales del factor de seguridad, el diseño del depósito puede ser cambiado significativamente antes de que la estructura se complete.

Hay numerosos métodos para hacer el análisis de estabilidad de taludes. Sin embargo, un análisis más detallado de estos métodos está más allá del enfoque de este trabajo. Vick (1990) y CANMET (1997), entre otros, proveen análisis mucho más detallados. Lo siguiente es una explicación breve de las redes de flujo, utilizadas para determinar las características del flujo de filtración dentro de un depósito.

##### 4.4.1 Análisis de Red de Flujo

En el manejo del análisis de estabilidad del dique, las redes de flujo pueden ser utilizadas para estimar la dirección y el volumen de la filtración y la presión de poro en puntos dentro del depósito (CANMET 1977). Una red de flujo es una solución gráfica a la ley de Darcy para mostrar el flujo constante a través de medios porosos y con frecuencia se utiliza para mostrar el flujo del agua en el

suelo. Las variables incluyen características del flujo (ya sea en términos del flujo o cabeza de descarga (head)), información sobre los límites del área a ser modelada, e información sobre la conductividad hidráulica dentro del área. Las condiciones de frontera son las características del flujo en los límites del sistema que se está modelando<sup>1</sup>.

En una red de flujo, se forma una cuadrícula con las intersecciones de líneas de flujo (el camino en el que una partícula individual de agua fluye a través de una región) y líneas equipotenciales (representando el contorno de cabeza) (Freeze y Cherry 1979). Según Vick (1990), para la mayoría de los depósitos, las redes de flujo proveen estimaciones conservadoras de las presiones de poro dentro del depósito, con la presión de poro estática en un punto siendo más o menos igual a su profundidad bajo la superficie freática.

Al trabajar con la infiltración y presiones de poro, es necesario entender algunas definiciones básicas en términos de conductividad hidráulica o permeabilidad. Homogéneo significa que la conductividad hidráulica (K) (o el coeficiente de permeabilidad) en el material (tierra natural o el depósito) es independiente de la posición. Isotrópico significa que la conductividad hidráulica es independiente de la dirección en el punto de medición. Si la conductividad hidráulica depende de la posición, entonces el medio es heterogéneo. Si la conductividad hidráulica de un medio depende de la dirección en el punto de medida, entonces el medio es anisotrópico.

En la generación de una red de flujo, se hacen ciertas suposiciones para resolver la ecuación, incluyendo que el flujo está en un estado estable y no transitorio (Freeze y Cherry 1979). Por este motivo, el uso de redes de flujo para determinar volúmenes exactos de filtración puede no ser preciso debido a las condiciones de flujo a menudo transitorio e insaturado en la mayoría de los depósitos de jales (Vick 1990).

En sistemas isotrópicos homogéneos, (sistemas donde la conductividad hidráulica es la misma a lo largo del medio en términos de localización y dirección) las líneas de flujo y las líneas equipotenciales se intersectan ortogonalmente, proveyendo la solución gráfica a la ley de Darcy.

---

<sup>1</sup>Para un medio isotrópico homogéneo en condiciones de frontera el flujo puede ser cero (una frontera impermeable), el flujo constante (límite de carga constante) o un nivel freático (donde la cabeza se aproxima a la presión atmosférica).

Si el medio es homogéneo y anisotrópico, la sección en transversal (antes de la adición de líneas de flujo) puede ser convertida a un sistema isotrópico por un coeficiente de las conductividades verticales y horizontales<sup>2</sup>, la construcción de las líneas de flujo es entonces conducida perpendicularmente a las líneas equipotenciales, así como con los sistemas realmente isotrópicos. Después de que se construye la red de flujo, se puede transformar de nuevo al sistema anisotrópico original (Freeze y Cherry 1979, CANMET 1977). Para sistemas de flujo heterogéneos, una red de flujo puede ser construida al dibujar las diferentes capas de conductividad hidráulica y refractando el flujo y las líneas equipotenciales cuando cruzan de una capa a otra<sup>3</sup>. También, el mismo volumen que existe en una capa debe entrar a la siguiente capa. Generalmente, las capas de mayor conductividad hidráulica tienen líneas de flujo relativamente horizontales comparadas con las capas de baja conductividad hidráulica con líneas de flujo relativamente verticales (Freeze y Cherry 1979, CANMET 1977).

Las redes de flujo generalmente son efectivas para presas aguas abajo y de línea central, las cuales generalmente imitan sistemas homogéneos. Vea la Figura 11 para ejemplos de red de flujo típica para depósitos bajo varias condiciones. Debido a las variaciones complejas en la permeabilidad (heterogeneidad compleja) y condiciones de frontera, las redes de flujo no siempre son realistas para depósitos aguas arriba. Se puede utilizar el análisis de elementos finitos y otros análisis (Vick 1990). Para información adicional en la construcción y uso de redes de flujo, vea CANMET 1977, Vick, 1990, y Freeze y Cherry 1979.

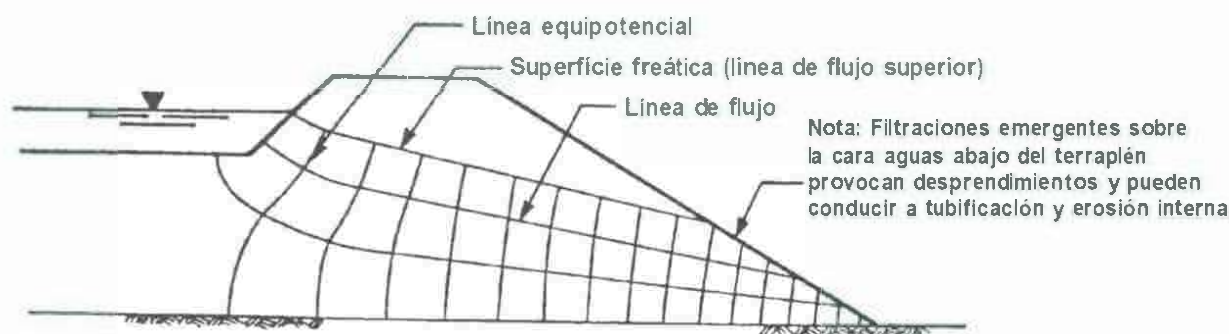


Figura 11. Ejemplos de Redes de Flujo en Diques de Jales

(Fuente: CANMET 1977)

<sup>2</sup>Convertir por la raíz cuadrada de la conductividad hidráulica en la dirección vertical por la conductividad hidráulica en la dirección horizontal.

<sup>3</sup>Se utiliza la ley de la tangente; Ver Freeze y Cherry 1979.

## 4.5 Modos de Fallo

Como fue notado anteriormente, el cálculo del factor de seguridad para un depósito de jales requiere un análisis de las superficies potenciales de fallo del depósito. Hay una cantidad de modos de fallo común a la que los depósitos pueden ser susceptibles. Éstas incluyen el fallo en la pendiente por deslizamiento rotacional, desbordamiento, fallo de los cimientos, erosión, tubificación y licuefacción. Cada modo de fallo puede resultar en una falla parcial o total del depósito.

### 4.5.1 Deslizamiento Rotacional

El deslizamiento rotacional, así nombrado porque la superficie de falla aparece como un segmento de un cilindro horizontal, puede resultar en fallas de pendiente que varían desde desprendimientos locales de jales en áreas aleatorias a lo largo de la cara de un depósito hasta deslizamientos arco circular masivos que se extienden sobre toda la estructura. En general, para una pendiente estable, la fuerza de cortante resistiendo el movimiento a lo largo de una superficie potencial de fallo es superior a la tensión de cortante tratando de inducirlo. La inestabilidad ocurre cuando la tensión de cortante en la superficie de falla es igual a la resistencia al cortante (Vick 1990). Específicamente, las causas de fallo rotacional pueden incluir cambios en el nivel freático, cambios en la permeabilidad de los materiales de los cimientos, perturbaciones al depósito causados por vibración o carga de impacto, asentamiento de los materiales de cemento, etc. (CANMETT 1977).

### 4.5.2 Fallo de Cimentación

Los fallos de cimentación no son raros en las estructuras con relleno de tierra. Cuando existe una capa débil de suelo o roca a poca profundidad en los cimientos debajo de la estructura, el movimiento a lo largo de un plano de falla ocurrirá si la carga del relleno produce tensiones mayores a la resistencia al corte del suelo en la capa débil (CANMET 1977).

### 4.5.3 Desbordamiento

Una de las causas más comunes de fallo es el desbordamiento por las aguas de inundación. El desbordamiento típicamente se produce cuando un volumen de líquido entra a un depósito, proveniente de la desviación inapropiada de los flujos de agua superficial o del flujo excesivo de agua de lluvias, superando la capacidad del depósito. Debido a que los depósitos de jales son construidos de material altamente erosionable, la fricción causada por el flujo rápido sobre la cresta de un depósito desprotegido puede rápidamente erosionar una quebrada en el material de relleno, permitiendo que ocurra la liberación constante. Además un rápido incremento en la presión de poro, asociado con la gran afluencia del flujo de entrada de aguas pluviales puede resultar en la licuefacción de arenas y finos depositados no-consolidados. El flujo alto sostenido sobre la cresta de un depósito puede entonces producir un fallo mayor en todo el depósito en cuestión de minutos (CANMET 1977).

#### 4.5.4 Erosión

En zonas de fuertes precipitaciones, normalmente se requiere alguna forma de protección contra la erosión. Los depósitos de jales pueden ser susceptibles al fallo de erosión en dos áreas principales, los contrafuertes de los depósitos y la cara del depósito. La erosión a lo largo de la línea de contacto entre el depósito y el contrafuerte puede resultar del flujo de aguas pluviales que ahí se concentra (CANMET 1977). Por lo general, éste tipo de fallo es prevenible con métodos de desviación de aguas pluviales adecuados, y por lo tanto recae en diseño o mantenimiento inadecuado. La erosión de las caras del depósito puede ser consecuencia de la ruptura en conductos de jales instalados en la cresta del depósito. Una vez más, el mantenimiento (y la ubicación alternativa de conductos de jales) pueden prevenir este tipo de fallo.

#### 4.5.5 Tubificación

La tubificación se refiere a la erosión sub-superficial a lo largo de un camino de filtración dentro o debajo de un depósito que resulta en la formación de un conducto de baja presión que permite el flujo concentrado. El tubificación puede resultar de filtraciones que salen de la cara de un depósito con velocidad suficiente para erosionar la cara del depósito. El espacio vacío resultante promueve la erosión progresiva que se extiende corriente arriba hacia el origen de la infiltración. En el peor caso, la filtración puede resultar en la creación de un canal directo del estanque de jales a la cara de la presa (CANMET 1977). La tubificación excesiva puede resultar en un fallo local o general del depósito o el cimientamiento del depósito.

#### 4.5.6 Licuefacción

La licuefacción es uno de los modos de fallo más comunes de las presas transversales al valle. Debido a que los depósitos de jales normalmente consisten en depósitos saturados y no-consolidados de granos de tamaños similares, son susceptibles a la suspensión temporal en agua (Vick 1990). Los jales licuefactados se pueden comportar como un fluido viscoso, de modo que pueden pasar a través de aberturas estrechas y fluir distancias considerables (CANMET 1977). En consecuencia, incluso hasta fallos de presas pequeñas pueden resultar en el escape considerable de materiales depositados si aquellos materiales quedan suspendidos.

Los factores que afectan el potencial de licuefacción incluyen:

- *Tipo de suelo* – Materiales con tamaño de grano uniforme, principalmente en el tamaño de arenas finas (la gradación típica del material de jales), son los más susceptibles a la licuefacción.

- *Densidad relativa o compactación* – Para un material dado, entre más compacto o denso sea, será más resistente a la licuefacción.
- *Presión de confinamiento inicial al momento de ser sometido a carga dinámica* – Esto ofrece una oportunidad en ciertas áreas de prevenir licuefacción al aplicar sobrecargas a los depósitos sueltos.
- *Intensidad y duración de los temblores de la tierra* – La licuefacción puede ocurrir debido a un terremoto intenso, o debido al movimiento prolongado del suelo.
- *Ubicación del nivel freático* – Una gran fuente de agua es perjudicial. Por lo tanto, un depósito de jales construido sobre una base permeable o una presa con una línea freática mantenida baja, al proporcionar características adecuadas de drenaje interno pueden tener un potencial de licuefacción muy reducido (Vick 1977).

Mediante la incorporación de sistemas de drenaje, el mantenimiento de una superficie de estanque baja y la compactación de los materiales de relleno durante la construcción, la densidad, la saturación y las presiones de confinamiento se pueden controlar para reducir la probabilidad de licuefacción. Si el depósito de jales es construido de arenas finas, la compactación de estas arenas aumentará su densidad y reducirá su susceptibilidad a la licuefacción. La compactación para obtener densidades relativas de 60% o mayores provee protección razonable (CANMET 1977). Por lo tanto, si los materiales del depósito provistos poseen una densidad relativa de 60% o mayor, o si la superficie freática se mantiene en una posición muy por debajo de la superficie del depósito, el depósito puede tener un factor de seguridad suficiente contra la falla por licuefacción. Los cálculos de diseño generalmente son necesarios para verificar esto para cada presa en específico.

#### **4.6 Monitoreo del Comportamiento**

El monitoreo rutinario y el mantenimiento preventivo son cruciales para asegurar el buen desempeño de los depósitos de jales. El monitoreo puede consistir en la observación visual del depósito de jales, monitoreo de piezómetros y otros instrumentos. El mantenimiento preventivo, basado en la observación oportuna de potenciales “puntos problema”, puede mantener la estabilidad de la estructura, controlar la infiltración y contener los costos. Las señales de problemas, tales como grietas, puntos húmedos en la cara aguas abajo, y asentamiento crítico, todas indican deficiencias en la estructura, pero sin la instrumentación adecuada puede ser difícil interpretar con precisión la magnitud del problema. Los piezómetros, manómetros de presión e inclinómetros pueden ser usados para mostrar tendencias en desarrollo en el comportamiento de los materiales depositados. Las observaciones que se hacen con estos instrumentos, combinadas con los registros de operación de la disposición que muestran las fechas y lugares de deposición, condiciones meteorológicas, etc., pueden ayudar a analizar la situación (Vick 1990).



La instrumentación se debe instalar en el depósito o en su base para monitorear los cambios que pueden ser críticos para la estabilidad, y con el fin de ayudar a predecir condiciones inestables. Los instrumentos pueden instalarse para medir la presión de poros de agua, flujos de filtración, movimientos del depósito y presiones totales.

La presión de poros de agua en suelos se puede medir con piezómetros. El piezómetro de Casagrande, un piezómetro simple y efectivo, tiene un elemento de piedra de cerámica porosa y está diseñado para medir los cambios de presión con un tiempo mínimo de retraso. Se instala en un hoyo perforado en el depósito o en su base y los niveles de agua son medidos con una sonda introducida en el hoyo. Otros tipos similares se pueden instalar usando plástico poroso, bronce poroso, cubierta de acero perforada o cubierta de acero y puntos de pozo. Los piezómetros hidráulicos y eléctricos también están disponibles y se pueden instalar a diferentes niveles dentro de un depósito. Estos piezómetros son generalmente más complicados de operar y su confiabilidad durante periodos prolongados requiere de mucho cuidado en su fabricación e instalación. Cuando se encuentra, el flujo de filtración que emerge aguas abajo del depósito puede ser recolectado y dirigido a un vertedero para mediciones de flujo. Los registros de flujo de filtración indican cuando ocurren cambios significativos y permiten una evaluación de problemas potenciales de tubificación.

Pueden ser utilizados métodos simples para la medición de movimientos de diques. Se pueden instalar marcadores en la superficie alineados en una línea de visión, para permitir la detección rápida de movimiento horizontal durante monitoreos periódicos. Mediciones sucesivas entre dos clavijas espaciadas a ambos lados de una ruptura indicaran ensanchamiento y aceleración en el ritmo de separación. Un aparato más avanzado para la medición del movimiento horizontal es el indicador de pendiente. Para este aparato, una carcasa cilíndrica telescópica se instala dentro del depósito durante su construcción. El elemento sensor se baja por ranuras dentro del entubado y mide la inclinación del entubado en dos direcciones a ángulos rectos. De las inclinaciones medidas, se pueden calcular los movimientos horizontales que ocurren a lo largo del entubado. Los asentamientos superficiales se pueden medir con el uso de un nivel o puntos de referencia temporales.

La frecuencia del monitoreo pueden dependerá de observaciones previas y la naturaleza crítica de los parámetros. En la mayoría de los casos, son importantes las observaciones frecuentes durante e inmediatamente después de completar la fase de construcción. Cuando los registros indican que las condiciones son relativamente estables, la frecuencia de las observaciones puede ser extendida. En algunos casos, las mediciones pueden ser necesarias solo después de la ocurrencia de condiciones inusuales como un fuerte escurrimiento superficial, crecidas máximas o actividad sísmica.

Las características de los jales y el método de construcción pueden cambiar sustancialmente a lo largo de los años requeridos para construir la presa. Estos cambios pueden alterar las condiciones que gobiernan la estabilidad del depósito. Pueden ocurrir cambios en los niveles de las crestas, niveles del agua, pendientes del dique, geometría de la sección transversal, condiciones de filtración y

características del material. Un programa continuo de inspección y mantenimiento es necesario desde el principio de la disposición y durante toda la vida de la presa. A través del monitoreo cuidadoso, las áreas preocupantes pueden ser notadas y rápidamente reparadas, así previniendo fallos. Además de monitorear la estabilidad de la presa, se puede evaluar el desempeño de revestimientos y sistemas de drenaje. Los pozos de monitoreo son útiles en el monitoreo de filtración.

## **5. CONTROL Y MANEJO DEL AGUA**

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, el fin de un depósito de jales es el contener los jales de forma económica y proveer a largo plazo tanto la estabilidad del depósito como la protección ambiental. El control y manejo de agua son tal vez los componentes más críticos del diseño y operación de los depósitos de jales. Los modos de falla analizados previamente están todos relacionados al agua en el depósito y/o dique. Igualmente, los impactos ambientales de los jales y depósitos están relacionados con el control y manejo del agua, ya sea directamente, como en el caso de la contaminación de agua superficial o subterránea, o indirectamente, como en el caso de transporte aéreo de jales secos. El agua ha sido analizada en la sección previa en términos de estabilidad; en esta sección se analiza en términos de desempeño ambiental. Recientemente, los asuntos ambientales han tomado protagonismo en el diseño de depósitos de jales, con preocupación especial sobre la calidad de los efluentes y filtraciones de los depósitos de jales, tanto para el agua subterránea como la superficial. Esta preocupación ha llevado a un incremento en el tratamiento de jales tóxicos previos a la descarga y más esfuerzo hacia la contención del agua de jales dentro del depósito. El esfuerzo posterior (es decir, la contención) es un reto que no se ha superado: de acuerdo a Vick (1990), algunos métodos de control de filtraciones son más efectivos que otros; sin embargo, "Cero vertidos", aún con el uso de revestimientos en el depósito, sigue siendo una meta difícil de alcanzar."

### **5.1 Agua Superficial**

El control del agua superficial es uno de los principales factores involucrados en el diseño y la operación de un depósito de jales. Un estudio de balance de masas puede ser utilizado para la gestión del agua, con las variables categorizadas en flujos entrantes y salientes. Los flujos salientes de un depósito de jales incluyen sobrellenado, evaporación, reciclaje y re-uso y filtración. El sobrellenado depende de la capacidad de almacenamiento de la presa y el volumen de flujo de una tormenta en la cuenca. Las tasas de evaporación son una función del clima, el área de superficie del estanque de agua libre y de los jales saturados. Los volúmenes de reciclaje y reutilización dependen de las capacidades y necesidades de la operación. La filtración puede salir de la presa como agua subterránea o filtración a través o debajo del depósito. Los flujos subterráneos se describen en una sección posterior. Los componentes superficiales y los subterráneos interactúan de forma dinámica y deben ser considerados juntos para cualquier análisis.

### 5.1.1 Evaluación del Agua Superficial

La estimación de los flujos de entrada y salida del agua superficial usando un estudio de balance de masa incluye componentes naturales y los hechos por el hombre. Las variables incluyen la precipitación (incluyendo eventos de tormenta), evaporación, corrientes de agua (incluyendo eventos de inundación), el componente líquido de los jales cuando es descargado en el depósito, agua regresada al depósito de algún sistema de retorno de filtraciones aguas abajo, evaporación, infiltración, agua de jales de decantación y reciclaje y cualquier descarga (sobre flujo). Ferguson y cols. (1985) también incluye descarga al estanque de agua clara resultante de la consolidación de jales.

Los datos de precipitación, los mapas topográficos, las mediciones de las corrientes de flujo y datos de profundidad de nieve son utilizados durante el diseño del depósito para preparar hidrogramas y curvas de frecuencia para su uso en la estimación de volúmenes esperados de precipitación y corrientes. Los hidrogramas, utilizados para los diseños de inundación finales, determinan los cambios en flujos entrantes y los ritmos de flujo máximos. Ilustran el flujo o escurrimiento en función del tiempo para las tormentas con varias intensidades o duraciones. Los hidrogramas están compuestos de interflujo, corrientes de agua superficial y flujo base (flujo atribuido a agua subterránea poco profunda). Los factores que afectan la forma y altura de los hidrogramas son la intensidad, duración y distribución de lluvia; tamaño de la cuenca, forma y patrón de drenaje (por ejemplo, dendrítico o enrejado); y los patrones de vegetación.

Los ritmos máximos de flujo de entrada son afectados por la intensidad de la lluvia y son indicados en un hidrograma como la cresta. La intensidad de la lluvia es indicada por la pendiente de la curva creciente. El área directa de escurrimientos es el área debajo del hidrograma menos el flujo base. El flujo base se indica en el punto donde el hidrograma cambia de pendiente (puntos de inflexión).

Las curvas de frecuencia, utilizadas para los diseños contra inundaciones en periodos de retorno, permiten que el diseñador determine los ritmos de descarga de una tormenta de diseño. La altura de la acumulación de nieves se incorpora a los diseños de las presas en áreas con gran cantidad de nieves o descongelado rápido. Las frecuencias de avalanchas en el área se consideran según sea apropiado. Se considera como regla que la nieve fresca tiene un 10% de contenido de agua, mientras que la nieve compacta y la primaveral tienen un contenido de 30% del volumen. Es válido enfatizar la importancia de controlar la nieve de rápido derretido por temporada. El Buró de minas establece que la falta de capacidad para nieve derretida fue considerada uno de los principales factores responsables para la falla del patio de lixiviación de Summitville, y los depósitos de jales son igualmente vulnerables.

El modelaje y análisis se puede utilizar para estimar los volúmenes de flujo de entrada y salida naturales, tales como la precipitación y evaporación. Los métodos para estimar algunos de los principales flujos de entrada y salida naturales son resumidos más adelante; los flujos de entrada y

salida adicionales, que tienen un elemento de control humano, se describen en la sección de controles de agua.

#### Eventos de Tormenta

Los volúmenes de escurrimiento se pueden calcular a través de los datos de precipitación, descargas y vegetación del área. Los datos de precipitación de años húmedos y secos se utilizan para proveer de volúmenes de escurrimientos mínimos, medios y máximos para determinar la capacidad de almacenaje y las estructuras de control para la presa. Los cálculos generalmente incluyen la variable de tiempo porque el área superficial de la presa se incrementará y el área de drenaje se reducirá conforme se almacenan más jales en el depósito. Hidrogramas y varios modelos de computadora, así como HEC (Cuerpo de Ingenieros del Centro de Ingeniería Hidrológica) y SWMM (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales), están disponibles para el cálculo de volúmenes de escurrimientos (Huber 1993).

Los grandes volúmenes de lluvia y nieve derretida en un periodo corto de tiempo pueden resultar en la erosión de las carreteras de acceso, daño a los diques, contaminación del agua superficial y fallos catastróficos de una presa de jales. Un diseño de presa incluye planes para contener o mitigar los volúmenes y ritmos de corriente asociados con una inundación. El tipo de inundación usado en un diseño depende del tamaño del depósito, la altura de la presa y las consecuencias asociadas con la muerte, economía y daños ambientales. Los diseños proveen protección contra un periodo de retorno de inundación (por ejemplo, 100 años) o una inundación extrema (definida como el máximo volumen de escurrimiento de un solo evento). Un diseño de inundaciones involucra la determinación de tasas y volúmenes asociados con los flujos entrantes y salientes en una presa como función del tiempo. Debido a que los depósitos de jales tienen la intención de ser permanentes (por ejemplo, más de 10 o 100 años, los intervalos de retorno comunes más usados), puede que sea apropiado considerar intervalos de retorno más largos (y/o de cuidado prolongado).

#### Infiltración

Las tasas de infiltración generalmente son bajas por el tamaño pequeño de las partículas y la baja permeabilidad en los jales. Las tasas de infiltración son una función de la humedad de la tierra, presión capilar, conductividad hidráulica insaturada y la distancia de la superficie. No hay corriente o estancamiento cuando la tasa de infiltración es menor a la conductividad hidráulica saturada. Las escorrentías y estancamientos ocurren cuando la tasa de infiltración es mayor que la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica saturada.

#### Evaporación

La evaporación es una función de la velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura y extensión del área de agua superficial. En general, es proporcional al área superficial del estanque de agua. Los depósitos en áreas áridas están diseñados para conservar y reciclar agua para procesos

mineros durante la vida activa de la mina. Los datos de evaporación para ciertas áreas están disponibles por parte del NOAA. Las pruebas de evaporación de tanques se pueden usar para determinar tasas de evaporación si el sitio no está localizado en una cuenca monitoreada por el NOAA. En esencia, una prueba de evaporación de tanque monitorea la pérdida de agua diaria en un tanque de Clase A (1.20m de diámetro y 25cm de profundidad), el cual se monta a unos 30cm sobre el piso. Un coeficiente de tanque (0.64 a 0.81) se utiliza para ajustar las tasas de evaporación del tanque porque serán más altas que las tasas de evaporación normales del lago. Cuando las tasas de evaporación de una cuenca son conocidas, el diseñador puede determinar si las dimensiones del área de superficie proveerán las tasas de evaporación requeridas. Debido a que la evaporación neta, al igual que la precipitación, no es constante de año a año, puede ser benéfico para reducir la tasa de evaporación calcular por un factor de seguridad para tener en cuenta la variabilidad anual.

### 5.1.2 Controles del Agua Superficial

Cada sitio requiere una red de controles de agua superficial distintas, esto es debido a las diferencias en la topografía, el clima, la hidrología, la geo-hidrología, etc. La mayoría de los controles son una combinación para acontecimientos de tormentas e inundaciones, control de filtraciones, reciclaje y procesos de deshidratación. Los métodos de control pueden ser utilizados primeramente en la etapa de diseño, situando el depósito lo más arriba del valle como sea posible. Un paso para minimizar el volumen de agua que entra y se filtra al depósito se lleva a cabo minimizando los ingresos de agua proveniente de fuentes externas a través de la desviación de las corrientes y arroyos de agua existentes. Esto, a su vez, reducirá los requisitos de tamaño para el depósito.

La capacidad de almacenamiento de una presa afecta el tamaño de las estructuras de control de escorrentías, la aplicabilidad de algunas estructuras de control, tamaño de depósito y factores de seguridad de un diseño. A su vez, es afectada por la velocidad, el volumen y la frecuencia de escorrentías en la cuenca. En general, el flujo entrante más el almacenamiento disponible en la presa debe igualar el flujo de salida de la presa. El almacenamiento máximo ocurre cuando el flujo entrante es igual al saliente.

En algunos casos, los flujos pluviales son administrados incrementando el bordo libre de la presa durante el diseño; sin embargo, esto resulta en aguas adicionales disponibles en el depósito para filtraciones. El uso de bordo libre puede ser económico en las zonas semiáridas donde las inundaciones son infrecuentes y la mina requiere una gran cantidad de agua para el proceso.

Los métodos principales para el control del ingreso de agua son colectores, represas y zanjas de desviación (canales y tuberías). Los colectores evitan que el agua superficial entre al área del depósito de jales pero generalmente requieren algún método sin pasar por el depósito de jales como sistemas de decantación o zanjas de desviación. Los colectores pueden ser caros debido a la mano de obra y material de relleno pero pueden ser rentables para pequeños volúmenes de escorrentía. El tratamiento

del agua puede no ser necesario debido a que el agua nunca entra al depósito en sí. Las reclamaciones de derechos del agua y efectos ambientales son aspectos importantes de esta alternativa porque la frecuencia y el volumen del agua liberada del colector afectarán áreas aguas abajo.

Los sistemas de decantación generalmente se usan en conjunto con otras formas de control de aguas superficiales. Los costos principales asociados con los sistemas de decantación son el bombeo, el mantenimiento y los costos de tratamiento. Puede ser difícil, en zonas con grandes volúmenes de escurrimientos superficiales, el proveer suficientes pozos para retener la esorrentía de forma oportuna.

Los canales de desviación (abiertos y cerrados) se pueden usar para la mayoría de los diseños de presas, sobre todo en presas en fondo de valle. Los canales cerrados (tuberías) generalmente se usan bajo presas transversales al valle debido a que las presas generalmente no permiten un canal lateral para desviación. El tratamiento del agua no es un problema con los canales de desviación si comienzan desviando el escurrimiento arriba de la presa. Sin embargo, la viabilidad a largo plazo de los canales de desviación debe ser considerada en el diseño.

Los vertederos generalmente están diseñados como estructuras temporales porque cambiarán (es decir, serán movidos o aumentaran su longitud) según los depósitos aumenten su altura. Se construyen de material impermeable capaz de resistir velocidades de flujo rápidas. El vertedero también está diseñado para contener y controlar saltos hidráulicos que suceden en la parte baja del vertedero. Además, el diseño del vertedero debe considerar y planear el tratamiento del agua si el escurrimiento de agua superficial pasa por la presa de jales.

## **5.2 Filtración de Jales**

Como se mencionó previamente, las redes de flujo y otros métodos analíticos pueden ser utilizados para calcular los volúmenes de filtración. Un método menos conservador para el estimado de la filtración es el uso de un planteamiento de balance de masa, calculando cada uno de los posibles flujos entrantes y salientes para determinar el movimiento de agua total (Ferguson, et al. (1985).

### **5.2.1 Flujo de Filtración (Dirección y Cantidad)**

La filtración es el movimiento del agua (contaminada y no contaminada) a través de y alrededor de la presa y el depósito. Los factores principales que afectan el volumen de filtración presente en un sistema son la profundidad de la capa freática y las capacidades de filtración de la zona insaturada y los jales. Las cantidades y calidad de agua de la filtración afectan el tipo de controles incorporados en el diseño de la presa.

Históricamente, la filtración controlada a través de presas ha sido alentada a bajar la superficie freática e incrementar estabilidad. La evaluación del volumen y dirección del filtrado se efectúa usando

R.7160212

principios hidráulicos similares a los que se usan en el diseño del depósito. Las mismas variables que se utilizan durante el diseño para predecir la superficie freática se pueden utilizar para estimar el volumen de flujo de filtración. Similarmente, variables como la permeabilidad del depósito y la base, que pueden afectar la superficie freática, también afectan las tasas y volúmenes de filtración. Sin embargo, datos más extensivos y exactos pueden ser requeridos para el cálculo de las presiones totales para el análisis. Las características de flujo de los depósitos de jales, sus bases y el suelo subyacente pueden ser vistas como un sistema interrelacionado, con componentes saturados e insaturados.

La evaluación de filtraciones puede requerir información sobre: (1) componentes de estudios geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, y (2) caracterizaciones físicas y químicas de los flujos entrantes de agua superficial, de la filtración y los jales. Los factores geológicos que afectan la filtración son la roca fracturada, lentes de arcilla y formaciones geológicas elevadas con grandes diferencias en la permeabilidad. Los datos hidrológicos se ven afectados por la intensidad de la lluvia, el tipo de suelo y las condiciones de la superficie. Estos datos se pueden utilizar para calcular las tasas de infiltración. Los estudios hidrogeológicos pueden determinar: (1) la ruta crítica y el grado de anisotropía del agua subterránea, (2) las condiciones de frontera para las evaluaciones del flujo de agua subterránea, (3) el contenido de humedad, permeabilidad y porosidad de los jales y la tierra subyacente, (4) el grosor de la zona insaturada y la franja capilar, y (5) la capacidad de almacenamiento, la conductividad hidráulica y la transmisividad de los jales y el acuífero subyacente. Las redes de flujo y otros modelos más complejos de flujo de filtración pueden ser preparados. Un planteamiento de balance de masas también se puede utilizar y es presentado por Ferguson y cols. (1985). Para información adicional sobre la determinación de volúmenes de filtrado y dirección, ver Vick (1990), CANMET (1977), y Ritcey (1989).

### 5.2.2 Calidad de Filtración

La composición química de la filtración de los jales es importante en la determinación de los impactos ambientales potenciales. Los factores incluyen las características de los residuos, tales como la mineralogía de la roca huésped, los métodos de molienda utilizados para producir los jales, la interacción de la filtración de los jales con el revestimiento (si existe) y el subsuelo. Vick (1990).

La movilidad de contaminantes se puede aumentar mediante procesos de minado físicos como la molienda (un tamaño pequeño de partícula resulta en un incremento del área superficial para la lixiviación). La mayoría de las compañías mineras manipulan el pH y usan agentes quelantes para extraer minerales de la mena. Los mismos procesos pueden ser aplicados al destino y transporte de contaminantes en jales. Aunque muchos metales pesados son hidrofóbicos con fuertes tendencias de adsorción para la tierra, los reactivos químicos usados en los procesos mineros pueden estar presentes en el material de jales. Son capaces de desorber los metales, haciéndolos móviles en aguas de lixiviación o aguas superficiales.

El agua contaminada puede formarse por la migración descendente de los constituyentes del depósito o el movimiento de agua subterránea a través de los jales. La mayoría del transporte de contaminantes en los sistemas de agua subterránea es de la advección (movimiento y mezcla de fluido) de los contaminantes. Los factores que afectan la tasa de advección incluyen la velocidad del agua subterránea/lixiviado, la quelación, el pH y los valores del coeficiente de reparto. La geoquímica del acuífero, las propiedades físico-químicas de los jales y filtraciones determinará la capacidad de amortiguación del suelo, los tipos de reacciones químicas (precipitación o neutralización) y el ritmo de adsorción e intercambio de iones.

Un problema relacionado es la producción de ácido por oxidación de tiosales, que es un problema para algunas minas de metal en el este de Canadá. La bacteria culpable es el *thiobacillus thiooxidans*. Los tiosales pueden ser removidos de la descarga de la planta mediante tratamientos biológicos (Guo y Jank 1980, citado por Vick 1990).

Según Vick (1990), la neutralización, la oxidación/reducción, adsorción, precipitación, el intercambio iónico y las reacciones biológicas juegan un rol importante en la composición química de las filtraciones de los jales. Estas son muchas de las mismas reacciones usadas en operaciones de molienda para liberar el mineral deseado. La calidad de filtraciones puede ser modelada usando métodos geoquímicos complejos. Vick (1990) y Ritcey (1989), entre otros, describen los métodos en detalle.

### 5.2.3 Control de Filtraciones

Hay dos opciones básicas para controlar el agua contaminada en los depósitos: manteniéndola en el depósito o capturándola cuando sale de él. Los controles de filtraciones son evaluados normalmente en las primeras etapas de diseño del depósito. Los objetivos son mantener la estabilidad del depósito, reducir las pérdidas de agua y mantener la calidad del agua en el lugar. Las opciones para el control de filtraciones incluyen la instalación de revestimientos por debajo de todo el depósito (para contener el agua y para excluir el agua subterránea), la construcción de drenajes para la recolección de filtraciones, la construcción de sistemas de colección y rebombeo (o tratamiento) de filtraciones, en veces en conjunto con barreras de baja permeabilidad, la construcción de muros de contención de baja permeabilidad y barreras del depósito (es decir, núcleos y revestimientos), deshidratación de jales anterior a su depósito y la reducción de la carga hidráulica al localizar el estanque de agua libre lejos del depósito. Algunas de estas técnicas se describen con más detalle a continuación.

#### Revestimientos

Los revestimientos no habían sido incorporados a los diseños de depósitos de jales hasta la década pasada o antepasada. Incluso ahora, debido a su alto costo, las compañías mineras suelen evitar el uso de revestimientos debajo de un depósito. Aunque los revestimientos pueden ser usados para sellar la



cara aguas arriba de una presa de jales, la mayoría de los depósitos de jales utilizados hoy en día no contienen un sistema de revestimiento. Los dos principales tipos de revestimientos utilizados para controlar el flujo a través de las presas de jales son de materiales sintéticos, los cuales son muy caros, y de revestimientos construidos con arcillas locales o con otros materiales disponibles. Los jodos a veces se utilizan como barreras de baja permeabilidad.

La cobertura de área necesaria para los depósitos es una consideración importante en los costos, especialmente para presas transversales al valle. El grosor puede variar dependiendo del tipo de revestimiento, pero la mayoría de los grosores pueden reducirse si son sobrepuestos con un sistema de drenaje para recolectar los fluidos, lo cual reduce la carga hidráulica (y tensión) en el revestimiento. Un drenaje subterráneo o ranuras de ventilación pueden ser necesarios para remover vapores subrasantes que de otra manera podrían levantar el revestimiento y para prevenir infiltración de agua subterránea a los jales. Los revestimientos deben ser resistentes a los componentes de los jales y filtraciones (tales como ácidos o sustancias causticas), a la erosión si se expone a la radiación ultravioleta, deformación por las tensiones de carga y sismicidad.

Los revestimientos de arcilla y sintéticos se pueden combinar para formar revestimientos dobles y triples. Para prevenir asentamientos grandes, los revestimientos de arcilla y sintéticos no se colocan sobre material suelto o de fácil compresión. Los diseños suelen incorporar cubiertas para mitigar los efectos de la luz solar, olas y exposición al viento en revestimientos de arcilla, sintéticos y el secado de revestimientos de arcilla. Los efectos de la acción de escarchado y secado son incorporados según se necesita a un diseño de revestimiento, especialmente para presas con fondos inclinados. Las fugas pueden ocurrir en los revestimientos sintéticos por la contracción, mala construcción de su costura, esfuerzos de tensión, exposición a radiación ultravioleta o planeación inadecuada y construcción de sub-grado. Generalmente se implementan planes de mantenimiento a corto plazo debido a que muchos problemas a menudo suceden dentro de los primeros seis meses de operación.

### *Revestimientos de Arcilla*

La arcilla puede ser una opción de bajo costo para los revestimientos, sobre todo en áreas con una abundancia natural de dicho material. Los revestimientos de arcilla varían en grosor de por lo menos 60 cm, proveen permeabilidad de  $10^{-6}$  cm/seg o menos, y pasan por pruebas de propiedades físicas como la permeabilidad, límites de Atterberg, contenido de humedad, compactación, cizallamiento y compresión. El ensayo estándar de compactación Proctor, el más comúnmente utilizado, compacta la tierra con un martillo de caída libre en un molde estándar (la tierra es compactada en tres levantamientos parejos usando 25 golpes por levantamiento de un martillo de 5 kg en caída libre de 45 cm.) Desde la curva de compactación se pueden determinar el contenido de agua contra el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima. El contenido de humedad óptimo proporciona el peso volumétrico seco máximo para el material. Los factores primarios que afectan la compactación son el tipo de tierra y la energía de compactación.

La densidad de un revestimiento de arcilla depende de su mineralogía, el método y grado de compactación. La arcilla puede ser compactada a un contenido de humedad y densidad prescritas para proveer una permeabilidad de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cm/seg o menor. Las curvas de distribución de tamaño de grano pueden ser usadas para determinar la cantidad de material de grano fino en la arcilla. En general una arcilla con alta plasticidad será más deseable que una arcilla de baja plasticidad por su baja permeabilidad, pero la constricción y el clima del sitio puede tener un efecto sobre la decisión. Se llevan a cabo pruebas químicas sobre el material de arcilla para determinar si es resistente a la filtración producida por la presa de jales. Los revestimientos de arcilla pueden ser suplementados con otros revestimientos (por ejemplo, sintéticos) para reducir más la filtración potencial.

Los revestimientos de arcilla pueden fallar cuando su permeabilidad crece considerablemente sobre el valor de diseño. Según Van Zyl, et al. (1988), las tres mayores causas de fallo son el asentamiento diferencial de la base, causando rupturas localizadas del revestimiento de arcilla; secado del revestimiento de arcilla (deseccación), que lleva al desarrollo de micro fisuras (que pueden ocurrir en áreas revestidas con arcilla demasiado anterior al tiempo en el que los jales mojados cubrirán el revestimiento o si los jales se secan después de ser depositados); y la alteración de la permeabilidad del revestimiento debido a reacciones geoquímicas entre el revestimiento y la solución de lixiviación.

#### *Revestimientos Sintéticos*

Los revestimientos sintéticos son un desarrollo relativamente nuevo en el control de filtraciones en los depósitos de jales. De los revestimientos rígidos, el concreto (rara vez usado) y el concreto lanzado pueden ser susceptibles al ataque de ácido y/o sulfato y el concreto asfáltico puede tener características de intemperismo y de desgaste por el sol (Kays 1977). Las membranas aplicadas por rociado han demostrado problemas de instalación, los cuales posiblemente necesitan ser resueltos antes de ser consideradas como una opción posible. Las membranas sintéticas de caucho (caucho butílico, EPDM) pueden ser demasiado costosas para depósitos de jales (Vick 1990). Vick provee una discusión sobre algunas de las características específicas de estos materiales, su diseño y efectividad. Estas membranas termoplásticas son los revestimientos más comunes considerados para depósitos de jales.

Se pueden hacer estimados de filtraciones a través de un revestimiento usando la Ley de Darcy. Revestimientos no-rígidos a menudo son agrupados en una categoría llamada geomembranas. Las geomembranas a menudo se usan en conjunto con revestimiento de arcilla para formar una combinación doble o triple de revestimiento. Las pérdidas de filtración a través de geomembranas se estiman con base en el flujo a través de un hoyo en la geomembrana. La mayoría de los revestimientos sintéticos son resistentes a los ácidos, bases y sales presentes en las filtraciones de presa. La permeabilidad de los revestimientos suele ser de  $10^{-9}$  a  $10^{-14}$  cm/seg con el grosor promedio de 40 a 60 milésimas de pulgada (CMA 1991). Tanto el costo como la factibilidad técnica son factores importantes en la selección de los revestimientos sintéticos, dado el gran tamaño y disparidad del terreno usualmente encontrado.

## *Lodos*

Los lodos de jales son económicos y fáciles de instalar como capas de baja permeabilidad para retrasar pero no detener la filtración. Para ser económicos, los lodos deben constituir la mayoría del total de jales de la planta, las arenas finas y gruesas deben ser extraídas de los lodos mediante un ciclón. Además, debe haber un sistema instalado que garantice la distribución en el estanque de jales (usando llaves traseras, frontales y laterales). Los lodos son usados a menudo para revestir la cara río arriba de las presas (o levantamientos) de jales. Aunque los lodos pueden ofrecer una alternativa de bajo costo para otros materiales, tienen varias desventajas que se discuten en Vick (1990) y Ritcey (1989). Además, es difícil determinar las permeabilidades de los lodos a largo plazo.

## *Barreras del Dique*

Las barreras del dique se instalan bajo el depósito e incluyen trincheras de corte, muros pantalla y cortinas lechadas. Una capa impermeable de relleno suele requerirse entre ellas y los jales. Las barreras se instalan bajo la porción aguas arriba de un dique de tipo aguas abajo y la porción central de los diques de tipo línea central; No son compatibles con depósitos aguas arriba. Un buen programa de monitoreo de la calidad del agua se necesita cuando se usan barreras de depósito para asegurar que sean completamente efectivas para interceptar flujos y también que el flujo no se mueva hacia abajo y contamine aguas subterráneas.

Las trincheras de corte, usualmente de 1.5 a 6 metros de profundidad, son el tipo de barrera de depósito más ampliamente usado para las presas de jales, sobre todo en áreas con grandes volúmenes de arcillas naturales. La deshidratación puede ser necesaria durante la instalación de trincheras de corte cuando se instalan por debajo del nivel freático.

Los muros pantalla son trincheras angostas los cuales son más adecuados para sitios con una topografía plana y que contiene suelos saturados o de grano fino. No son compatibles con sistemas de lecho de roca fracturado. Los muros pantalla son instaladas cavando una trinchera a una zona de material de baja permeabilidad y llenando la trinchera con un suelo/lodo bentonítico el cual es permitido asentarse a la consistencia de la arcilla. Las profundidades promedian los 12 metros y las permeabilidades obtenidas pueden ser tan bajas como  $10^{-7}$  cm/seg.

Las cortinas lechadas usan cemento, materiales de silicato o resinas acrílicas como barreras al movimiento de filtraciones. Son limitadas a sitios con material de grano grueso (arenas medianas a grava o piedra fracturada con uniones continuamente abiertas) y puede extenderse a profundidades mayores a 30 metros. Las permeabilidades obtenidas pueden ser tan bajas como  $10^{-8}$  cm/seg. Sin embargo, pueden ocurrir fugas a través de ciertas juntas de cortina o corrosión subsecuente de la cortina (Vick 1990).

Más que simplemente interceptar y contener los flujos de filtraciones, las barreras pueden tener drenajes de grava (u otros materiales permeables, filtrados apropiadamente) inmediatamente cuesta arriba para permitir que las filtraciones sean removidas o dirigidas a desagües inferiores del dique. Las barreras y sistemas de colección de filtraciones también pueden ser usados cuesta abajo de depósitos para prevenir más descargas ambientales.

#### Sistemas de Rebombeo

Los sistemas de rebombeo consisten de estanques de filtraciones y pozos de colección de filtraciones instalados cuesta abajo del depósito que están equipados con bombas que mandan las filtraciones de vuelta al depósito para ser usado como agua de proceso. Las prácticas actuales incluyen el uso de estanques bases o estanques de filtraciones para coleccionar las filtraciones. En algunos casos, drenajes inferiores o drenajes bases son diseñados para fluir al estanque de filtraciones. Sin embargo, en otros casos, estos sistemas son instalados después de la construcción del depósito como acción remedial para coleccionar filtraciones inesperadas. Estas unidades pueden ser usadas en conjunto con muros pantalla, zanjas de corte o cortinas lechadas para minimizar filtraciones cuesta abajo. Dependiendo de la calidad de flujo saliente puede continuar la operación del sistema de rebombeo indefinidamente.

### 5.3 Tratamiento de Agua de Jales

Los estanques de jales pueden ser efectivos para clarificar el agua previamente al descargue. Muchos factores influyen la efectividad del estanque para proveer suficiente tiempo de retención para permitir que se asienten las fracciones muy finas antes de llegar al punto de flujo saliente o el tiempo para que se degraden los contaminantes inestables. Los factores que afectan el tiempo de asentamiento son el tamaño del molido, la tendencia de lodos (particularmente con materiales tipo arcilla), pH del agua, acción de olas, profundidad del agua y distancia entre la descarga de jales y la descarga de efluentes. Aunque las velocidades de sedimentación de sólidos de varios tipos y tamaño de grano pueden determinarse tanto teórica como experimentalmente, muchos factores influyen la efectividad del estanque de decantación como un dispositivo de tratamiento.

La molienda requerida para liberar el mineral valioso suele estar por debajo de la malla #200. Las partículas dentro del rango de 50  $\mu\text{m}$  con un ritmo de asentamiento de 0.05 pulg/seg (0.12 cm/seg) pueden ser afectadas por la acción de molienda pero se sedimentarán en un tiempo razonable. Las partículas de 2  $\mu\text{m}$  o menos pueden causar un problema de turbidez. Dichas partículas tienen ritmos de asentamiento de menos de 0.01 pulg/seg (0.025 cm/seg) en agua quieta y, bajo condiciones prevalentes en la mayoría de los estanques de jales, requieren varios días para sedimentarse debido a la turbulencia causada por la acción de las olas.

Las observaciones de estanques existentes han llevado a reglas generales para la clarificación. El estanque debería proveer de 4 a 10 hectáreas de área de estancamiento por cada 1,000 toneladas de

sólidos de jales transportados diarios y debería proveer 5 días de tiempo de retención. Un promedio de 15 acres por 1,000 toneladas se suele considerar adecuado.

## **6. CASO DE ESTUDIO: DEPÓSITO DE JALES DE LA COMPAÑÍA MINERA STILLWATER**

A principios de 1980, la Compañía Minera Stillwater planeaba el desarrollo de una mina de platino y paladio aproximadamente a 124 kilómetros al sur de Billings, Montana. Las regulaciones del Estado de Montana requieren una mina para someterse a una aplicación sobre minería de roca dura y obtener un permiso de minería de roca dura antes de que puedan comenzar la construcción de la mina y sus instalaciones (las actividades de exploración pueden continuar durante el proceso de obtención de permisos).

El diseño del reporte de ingeniería para el depósito de jales Stillwater fue sometido al Departamento de Suelos Estatales de Montana en Febrero de 1987. Su propósito era presentar información comprensiva sobre todas las actividades que habían sido conducidas en el sitio en relación con el diseño de futuros depósitos de jales y presentar el diseño para adecuarse al criterio ingenieril desarrollado como resultado de la evaluación del sitio, las características de los jales, las regulaciones ambientales y operaciones futuras. El reporte incluye un alcance de labores que indica las varias tareas que se habían llevado a cabo al conducir el estudio. Estas tareas fueron enlistadas de la siguiente manera:

- Elaborar memorias de los criterios base de diseño de proyectos.
- Supervisar la perforación del suelo, realizar pruebas de las excavaciones de fosas y pruebas de densidades en campo.
- Preparar y administrar programas de pruebas de laboratorio de suelos y jales.
- Llevar a cabo análisis de estabilidad estáticos y pseudo-estáticos y estimar las deformaciones de inducción sísmica de la presa debido a un Máximo Evento de Terremoto Creíble.
- Llevar a cabo estudios hidrológicos para determinar el diseño para inundaciones y escorrentías del depósito y las curvas del perfil de agua en acueductos naturales resultantes de eventos de inundación designados.
- Llevar a cabo estudios de almacenaje para diseñar un sistema de drenaje de jales.
- Seleccionar materiales adecuados para el revestimiento del depósito.

- Estimar las cantidades de material de construcción y preparar las curvas secuenciadas de construcción mostrando la elevación de la cresta del dique requerida y elevación de jales a lo largo el tiempo.
- Preparar planes de inspección, mantenimiento y contingencia.
- Preparar dibujos de diseño de las etapas iniciales, finales y requeridas del depósito.
- Preparar un reporte de ingeniería.
- Preparar planes y especificaciones técnicas suficientes para el permiso de construcción.

## **6.1 Evaluación del Sitio, Exploración de Campo y Pruebas de Laboratorio**

### **6.1.1 Evaluación del Sitio**

Los consultores responsables por todos los aspectos del diseño del depósito de jales realizaron su primer reconocimiento del sitio en agosto de 1983. El propósito de esta visita fue el observar la base del área de desecho de jales propuesta, determinar si existe evidencia de posibles deslizamientos de tierra y fallas geológicas en el sitio o en la vecindad del sitio y buscar materiales que podrían ser usados en la construcción del depósito. El resultado de esta exploración e información previamente recolectada de un barreno, indicó que la base debajo del sitio propuesto estaba compuesta de materiales permeables, gravas y rocas grandes en una matriz de arena limosa. Afloramientos prominentes de granito inalterados fueron notados como soportes de la presa depositadora de jales. Los materiales de deslizamiento de tierra fueron notados sobre el área de presa de jales, pero se determinó que eran estables en base a la inclinación natural y la falta de evidencia de inestabilidad (como rupturas de tierra y árboles inclinados). Fallas geológicas y de cizallamiento fueron notadas en los afloramientos de granito al oeste inmediato del depósito propuesto, el geólogo llevando a cabo la exploración indicó que la falla no estaba activa y que no tendría el potencial de fracturar el revestimiento del estanque de jales.

### **6.1.2 Exploración de Campo**

Un estudio de refracción sísmica realizado en el área del depósito en 1983 determinó que la profundidad de la roca de fondo variaba de 9.45 a 69 metros bajo la superficie en un valle en forma de artesa.

Pozos de prueba de hasta 6.7 metros bajo tierra en 1983 y 1985 exploraron las condiciones del suelo en el estanque y el área de base de la presa. En el lugar fueron realizadas pruebas de densidades en 14 de los barrenos, nueve en la locación de la base propuesta para la presa. Los primeros 30 a 60 centímetros superiores de los barrenos de prueba consistían de suelos marrones arenosos y limosos y,

debajo de esta capa de tierra, el material del barreno estaba compuesto en gran medida de arena, grava, guijarros y cantos rodados con solo 2 a 17 por ciento de finos limosos. El escombros de construcción (de una mina anterior), las tuberías abandonadas y otros materiales no-naturales fueron descubiertos durante la excavación de los agujeros. La densidad seca promedio se determinó de 2.082 toneladas por metro cúbico. Los resultados del estudio de refracción sísmica indicaron que las densidades de la tierra se incrementaron bajo el fondo de los agujeros.

Ocho pozos de monitoreo perforados en el área de depósito entre 1979 y 1983 proveyeron información de agua subterránea a nivel base y condiciones de cimientos. La superficie del agua subterránea variaba de 12 a 30 metros bajo la superficie, pero se encontró que la roca de fondo en la porción oeste del depósito propuesto hacía una frontera de agua subterránea y los pozos al oeste de esta área estaban secos. Se hicieron cinco perforaciones variantes de 16.5m a 22.5 metros de profundidad al área de cimentación. La Prueba Estándar de Penetración (ASTM D-1586) fue usada durante las perforaciones, pero los resultados solo se usaron para evaluar la densidad de las arenas y grava en términos de calidad. Muestras representativas de suelo removidas durante las perforaciones fueron mandadas al laboratorio para su evaluación.

### 6.1.3 Pruebas de Laboratorio

Las pruebas de laboratorio de los materiales prestados que serían usados en el dique propuesto y los suelos de cimentación incluían un análisis de tamaño de grano (pasar por mallas y hidrómetro), límites de Atterberg, contenidos de humedad natural y gravedad específica. Las pruebas de límites de Atterberg indicaron que los finos mostraban de poca a nula plasticidad. El contenido de humedad natural se determinó en rango de 1% a 7%. Las pruebas de compresión triaxial también se llevaron a cabo en materiales prestados a ser usados en el diseño del dique. Los parámetros de fuerza resultantes se usaron en análisis de estabilidad preliminares. Pruebas de compresión triaxial consolidadas y no-drenadas con mediciones de presión de poros se llevaron a cabo en muestras recompactadas de materiales prestados del dique y materiales de la cimentación.

En las pruebas de compresión triaxial, las muestras de suelo de cimentación recompactadas a la densidad seca promedio de cimentación determinada en el campo (130 pcf) fueron escogidas para tener un ángulo efectivo de fricción interna de 35 grados y una cohesión efectiva de cero.

Los resultados del laboratorio en la prueba de compactación mostraron que la máxima densidad seca de las arenas y gravas del depósito (materiales del dique) van desde 148 pcf a 159 pcf con contenidos óptimos de humedad que van desde 5 a 8 por ciento. La alta densidad de los materiales se atribuye a su alta gravedad específica (3.0 a 3.2).

En las pruebas de compresión triaxial, las muestras de suelo del depósito se compactaron a 95% de la máxima densidad seca determinada por ASTM D-698 (140 pcf). Se determinó que el ángulo efectivo de fricción interna era entre 39 y 41 grados con una cohesión efectiva de cero.

También se hicieron pruebas de laboratorio para jales, producidas de una molienda piloto sobre el mineral del sitio minado. Solo los finos fueron probados (flujo superior del ciclón) dado que los jales ásperos serían depositados bajo tierra. La gradación, los límites de Atterberg y la gravedad específica fueron determinados para la muestra, así como pruebas de sedimentación para determinar la densidad de los jales asentados. Se condujeron pruebas de consolidación para estimar la variación de la densidad de jales con características de profundidad y ritmo de asentamiento.

También se propuso la roca estéril de la mina para ser usada en la construcción de los diques de la presa, sin embargo, no se presentaron resultados de pruebas de campo o laboratorio en el reporte de ingeniería. Los resultados de las observaciones visuales señalaron que la roca estaba moderadamente bien clasificada de polvo de roca fina a 24 pulgadas, con la mayor proporción de material en el rango de 3 a 6 pulgadas. La roca se describió como moderadamente dura con orillas angulares y afiladas. El escombro (tubos, madera, lonas de plástico y mallas metálicas) se observaron mezclados con la roca estéril.

## **6.2 Evaluaciones de Oficina**

Las evaluaciones hidrológicas y análisis de estabilidad requeridas para el diseño de la presa de jales se pueden lograr usando los resultados de las pruebas de campo y laboratorio, así como mapas, información y datos publicados.

### **6.2.1 Evaluación de Hidrología**

El Río Stillwater fluye aproximadamente de sur a norte justo al este del sitio del depósito de jales. Un pequeño tributario del río Stillwater, el arroyo Mountain View, yace justo al sur del depósito. El dique base se diseñó para estar de 60 a 90 metros al oeste del río Stillwater y 15 metros al norte del arroyo Mountain View.

Las cuencas para el río Stillwater y el arroyo Mountain View fueron estimadas, así como las zonas de captación del depósito de jales. Éstas fueron presentadas en el reporte de ingeniería de la siguiente forma:



Cuenca	Área de drenaje	Elevación media de cuenca
Captación del depósito de jales	275 m <sup>2</sup>	1,676m
Depósito de jales final	142 m <sup>2</sup>	
Arroyo Mountain View	3.83 km <sup>2</sup>	2,225m
Río Stillwater sobre la Confluencia View Creek	495 km <sup>2</sup>	2,743m

Los registros de flujo de la estación de medición más cercana al sitio de minado con un largo periodo de registro (localizado a 40 km aguas abajo del sitio) muestra que el flujo máximo registrado fue de 340 metros cúbicos por segundo. El área de drenaje en esta locación es de 2,525 km<sup>2</sup>.

Los volúmenes de almacenamiento de inundaciones fueron determinados para el tamaño del depósito para evitar desbordamientos. El para inundaciones del depósito se basa en el tamaño y las clasificaciones de riesgos potenciales aguas abajo según las "pautas recomendadas para la inspección de seguridad de presas" (RSGI por sus siglas en inglés) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE). La guía recomienda que el diseño para inundación de este depósito debería oscilar entre la mitad de la Inundación Máxima Probable (IMP) a la IMP entera. La mitad de la IMP fue elegida como el diseño de inundación para el depósito a alturas intermedias y la IMP completa para los depósitos en etapas que exceden una altura de 30 metros.

Los estimados de IMP y media IMP fueron determinados para el área de captación del depósito de jales, la cuenca del arroyo Mountain View y la cuenca del río Stillwater en confluencia con el arroyo Mountain View. Los programas de computación del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EU, usados para determinar hidrogramas de inundación (HEC-1) y perfiles de la superficie del agua (HEC-2), fueron empleados en el esfuerzo de estimación.

Otros datos básicos usados para el estudio de IMP se obtuvieron de varias otras fuentes. La precipitación máxima probable (PMP) para tormentas locales de seis horas y generales de 72 horas fueron desarrollados del "Reporte hidrometeorológico No. 55, Máxima precipitación probable estimada – Estados Unidos, entre la cordillera central y el 103vo meridiano". La PMP para tormentas de 72 horas asume cantidades ilimitadas de nieve asentada para derretirse dado que las tormentas maximizadas ocurren principalmente de finales de mayo a todo junio (derretimiento de primavera). Los estimados de derretimiento estuvieron basados en el "desbordamiento por deshielo" del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EU, dado que no había datos actuales de acumulación de nieve y deshielo disponibles. Las temperaturas y velocidades de viento durante la PMP fueron calculadas siguiendo los procedimientos en el "Reporte hidrometeorológico No. 43, Máxima Precipitación Probable, Estados

del Noroeste". Hidrogramas unitarios, infiltración y pérdidas de retención fueron desarrollados a partir de los procedimientos del Servicio de Conservación de Suelos.

Los resultados del programa de computadora HEC-1 determinaron los siguientes resultados de los diseños de inundación, como se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2. Diseño de Inundaciones Calculado de la Compañía Minera Stillwater**

Diseño de tormenta	Depósito de jales	Arroyo Mountain View	Río Stillwater por encima de la Confluencia con el arroyo Mountain View	Río Stillwater por debajo de la Confluencia con el arroyo Mountain View
Volumen IMP (72-hr. más derretimiento)	384,845.76m <sup>3</sup>			
½ Volumen IMP (72-hr. más derretimiento)	192,422.88m <sup>3</sup>			
Caudal máximo IMP (PMP 6-hr. tormenta local)		318 m <sup>3</sup> /s		
½ Caudal máximo IMP (PMP 6-hr. tormenta local)		159 m <sup>3</sup> /s		
Volumen IMP (72-hr. más derretimiento)		233 m <sup>3</sup> /s	9344 m <sup>3</sup> /s	9368 m <sup>3</sup> /s
½ Volumen IMP (72-hr. más derretimiento)		117 m <sup>3</sup> /s	4672 m <sup>3</sup> /s	4684 m <sup>3</sup> /s

(PMP) = Precipitación máxima probable.

(IMP) = Inundación máxima probable.

El programa de computadora de perfiles de agua superficial HEC-2 se usó para determinar las elevaciones máximas de la superficie del agua y velocidades de flujo para el caudal máximo de IMP y ½ IMP en el ensanchamiento del río opuesto al depósito de jales. Las secciones del río (secciones cruzadas y longitudinales) se asumieron estables, sin desprendimientos del banco o socavaciones. Esto es de una suposición conservadora, puesto que es probable que la socavación suceda durante una inundación de magnitud IMP y esta socavación ensancharía y haría más profundo el canal. Las elevaciones calculadas de agua superficial resultantes de la IMP en el río Stillwater exceden localmente la punta del diseño del dique por 4.6 m, sin embargo, esto dejó 1.5 m a la parte superior de la punta del dique. La ½ IMP excedió la cota inferior de la punta del dique por alrededor de 1.2 m y la distancia que quedó al tope de la punta del dique fue de 4.9 m. La punta del dique está más allá de los límites de las llanuras de inundación de 100 y 500 años calculadas.

Los cálculos de velocidad indicaban que la erosión ocurriría bajo condiciones de IMP y  $\frac{1}{2}$  IMP tanto en el río Stillwater como en el arroyo Mountain View. La tormenta de  $\frac{1}{2}$  IMP no se consideró de ser tal grado que causara fallo total de la presa. La tormenta IMP se consideró que crea suficiente erosión para causar el fallo total de la presa.

### 6.3 Diseño del Depósito de Jales

En la mina Stillwater, los jales eran separados mediante ciclonado en fracciones ásperas y finas; las fracciones ásperas serían depositadas bajo tierra y las finas serían colocadas en el depósito de jales revestido.

Los planes de ingeniería para el depósito de jales indican que los jales enteros en ocasiones se pueden colocar en el depósito. Un ritmo de producción total de 500 toneladas secas diarias de jales durante los primeros 4 años (aproximadamente la mitad de lo cual sería puesto en el depósito como jales finos) se estimaron para el diseño de jales. Se estimó que la producción de jales ocurriría 330 días al año, 24 horas al día. Se asumió que los jales tendrían un contenido de sólidos de 30% y la fracción fina tendría un contenido de sólidos de 18%.

El diseño del depósito, una modificación de un monte lateral, pide que el depósito sea elevado en cuatro etapas a lo largo de la vida de la mina. Este diseño y la elevación final de la cresta de la presa se basaron en los estudios preliminares y una vida de la mina de 20 años. La altura máxima de la presa sería de 40 metros y el ancho de la cresta se diseñó de 6.1 m para permitir el tráfico de vehículos y un tubo de lodos de jales. Las pendientes aguas arriba de la presa fueron diseñadas de 1.6:1 y las pendientes aguas abajo de 2:1 determinadas por los análisis de estabilidad estática y dinámica.

La excavación del depósito ocurriría en las etapas uno y dos para proveer materiales de construcción para el dique y para incrementar la capacidad de almacenamiento del depósito. Cada nueva etapa del dique sería agregada en la dirección aguas abajo.

Las etapas del dique y las estadísticas estimadas de vida de cada etapa están enlistadas a continuación basadas en una fecha de arranque de 1987.

Numero de etapa	Elevación de la cresta del dique (m)	Año Aproximado de Finalización de las etapas de construcción de la presa	Año Aproximado de Llenado de Etapa
1	1538	1986	1992
2	1547	1991	2002
3	1553	2001	2007
4	1555	2006	2009

El depósito fue diseñado para almacenar el volumen del diseño de inundación. El diseño de la revancha (90 cm mientras contienen el volumen del diseño de inundación) se determinó del volumen de almacenamiento de inundación y consideraciones operacionales.

El depósito sería monitoreado para su asentamiento usando equipos de prospección colocados a lo largo de la cresta de la presa. Los piezómetros serían instalados en el cimiento de la presa para monitorear filtraciones.

El diseño pide la instalación de un revestimiento sintético para minimizar la migración de flujo saliente del depósito al agua subterránea. La instalación del revestimiento se planeó por etapas para coincidir con los levantamientos del dique. Este plan no solo reduce costos, también previene daño potencial a porciones del revestimiento que estarían expuestos por muchos años. El revestimiento se seleccionó basado en la economía, resistencia química, resistencia al clima, facilidad de construcción, fuerza y durabilidad. Revestimientos Hypalon y HDPE estaban siendo probados al momento del reporte de ingeniería. En base a pruebas iniciales (simulaciones del ambiente del estanque de jales), parecía que el revestimiento HDPE no experimentó cambios en sus propiedades materiales mientras que el revestimiento Hypalon experimentó algunos cambios en sus propiedades materiales. Los procedimientos de instalación del revestimiento requirieron remover todos los objetos (rocas, escombros, terrones, objetos afilados, etc.) que pudieran potencialmente dañar el revestimiento. No se han obtenido cifras relacionadas.

Para completar la evaluación de la efectividad de revestir el depósito de jales se necesita información adicional. Sin embargo, este ejemplo de depósito de jales muestra que la industria minera está investigando opciones para revestir depósitos de jales y que en algunos casos, los revestimientos puedan ser una alternativa factible. El estudio de este caso ejemplifica la cantidad de estudio necesario para probar la factibilidad de usar un revestimiento sintético. Estudios adicionales (Los cuales no se obtuvieron previamente a la preparación de este reporte) pueden proveer un análisis del equilibrio del agua y cómo ha sido afectado por el revestimiento sintético. El análisis de costo final (Tampoco obtenido) ayudará a proveer una medida de la factibilidad de revestir depósitos con revestimientos sintéticos. Este diseño de depósito ha sido aprobado por el estado de Montana y actualmente el depósito opera como se planeó, proveyendo un ejemplo mostrando que el revestimiento de depósitos puede ser una opción factible para minimizar la filtración y el impacto ambiental.

## GLOSARIO

**Anular:** En forma de anillo

**Bio-oxidación:** es una alternativa en el que por medio de microorganismos se degrada la matriz del mineral, en el que el metal (oro) queda enriquecido en la fase sólida.

**Carga estática:** La que considera el peso exclusivamente.

**Carga sísmica:** La carga sísmica es un concepto utilizado en ingeniería sísmica que define las acciones que un sismo provoca sobre la estructura de un edificio y que deben ser soportadas por esta.

**Ciclizado:** Es el método que se aplica a los jales enteros para separarlos en dos fracciones: arenas (fracción gruesa de los jales) y lamas (fracción fina de los jales).

**Componentes oxidables:** Componentes que se pueden oxidar. Por ejemplo: tiosales, cianuros, reactivos de flotación.

**Confinamiento:** Aislar algo. Ejemplo: se necesita un confinamiento controlado para los residuos peligrosos.

**Contaminante tóxico:** Sustancia venenosa o que produce efectos nocivos en el organismo y que también puede alterar negativamente la flora, fauna o algún lugar en contacto con él.

**Densidad:** Relación entre la masa y el volumen de una sustancia o cuerpo.

**Deslizamiento rotacional:** La superficie del deslizamiento ocurre internamente en el material, de forma aproximadamente circular o cóncava (como una cuchara o un cilindro). Las salidas de las superficies circulares de rotura pueden ocurrir en diferentes partes de un talud. Así tenemos la superficie de rotura de talud, superficie de rotura del pie del talud y superficie de rotura de base del talud. La velocidad de estos movimientos varía de lenta a moderada y se ve acelerada generalmente con lluvia excesiva.

**Depresión:** Concavidad de alguna extensión en un terreno u otra superficie.

**Desaguar:** Extraer o hacer salir el agua de un lugar.

**Dique:** Muro alto y ancho construido con suelo nativo, arenas de jales, roca estéril y/o material de préstamo cuya finalidad es contener los jales en algún depósito.

**Distribución del flujo:** Acción de verter los jales hacia el talud aguas arriba, desde las llaves ubicadas en la cresta de la presa de forma que se sedimenten uniformemente o bien distribuidos.

**Dique elevado por etapas:** Muro alto y ancho el cual se va construyendo por etapas durante la vida de la mina con suelo nativo, arenas de jales, roca estéril y/o material de préstamo cuya finalidad es contener los jales en algún depósito.

**Emplazamiento:** Colocación en un lugar.

**Estabilización:** Hacer llegar a la capacidad de permanecer constante o mantener firme y sin cambios a un sistema, componente o sustancia.

**Geotecnia:** Parte de la geología aplicada que estudia la composición y propiedades de la zona más superficial de la corteza terrestre, para el asiento de todo tipo de construcciones y obras públicas.

**Hidrogeología:** Parte de la geología que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación.

**Homogenización:** Hacer que los elementos diversos de un compuesto, mezcla o sustancia queden iguales, uniformes u homogéneos.

**Inmersión:** Introducción de algo en un líquido.

**Jales:** son un conjunto de desechos tóxicos subatómicos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente constituidos por una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas.

**Licuefacción del suelo:** La licuefacción de suelo describe el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado. Es un tipo de corrimiento, provocado por la inestabilidad de un talud.

**Permeabilidad:** La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.

**Piezómetro:** Los piezómetros son comúnmente utilizados para medir la presión del agua que puede ser inducida durante la construcción de la presa.

**Porosidad:** La relación generalmente expresada como porcentaje de 1) volumen de vacíos de una masa de suelo dada a 2) el volumen total de dicha masa de suelo.

**Presa tradicional de retención de agua:** En ingeniería se denomina presa o represa a una barrera fabricada de piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construye habitualmente en una cerrada o desfiladero sobre un río o arroyo. La finalidad común de este tipo de presas es almacenar agua pero en minería se utilizan también para retener los jales.

**Presión atmosférica:** Presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie de la Tierra.

**Presión de poro:** Esfuerzo transmitido por el agua intersticial.

**Rebombeo:** Bombeo en serie en una tubería a presión.

**Revancha:** la diferencia menor, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o de la superficie del agua, que se produce en los tranques y embalses de relaves.

**Revestimiento:** Colocación de una capa de cualquier material para proteger o adornar una superficie.

**Roca estéril:** Denominación a la roca de menor calidad a la requerida o sin ley.

**Sedimentación:** La sedimentación ocurre cuando un material sólido es transportado por una corriente de agua y se posa o deposita en el fondo del río, embalse o un lugar construido especialmente para tal fin.

**Subacuático:** Que tiene lugar bajo el nivel del agua o se desarrolla allí.

**Sulfuro:** Combinación de azufre con otro elemento químico más electropositivo; generalmente está presente en minerales como la pirita, la calcopirita, la galena o la blenda.

**Superficie freática:** Es la cota de los puntos en que el agua de poros tiene presión neutra igual a cero.

**Tajo activo:** Tajo de mina el cual se encuentra en funcionamiento (se está explotando).

**Tubificación:** La tubificación en un suelo es la erosión progresiva en forma de conductos huecos que se produce en los diques por efecto de la presión del agua dentro de una red de flujo, erosión iniciada en una filtración concentrada en el talud aguas abajo y encauzada hacia el talud aguas arriba.

**Turbidez:** Se entiende por turbidez o turbiedad la falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión.

## 7. REFERENCIAS

- Bedient, P.B. and W.C. Huber. 1989. *Hydrology and Floodplain Analysis*. Addison-Wesley: Menlo Park, 650 pages.
- Bishop, A.W. 1955. "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes." *Geotechnique*, Vol. 5, No. 1, pp. 7-17.
- Bishop, A.W. 1971. "The Influence of Progressive Failure on the Choice of the Method of Stability Analysis." *Geotechnique*, Vol. 21, No. 2, pp. 168-172.
- Brawner, C.O. and D.B. Campbell. 1973. "The Tailings Structure and its Characteristics - A Soil's Engineer's Viewpoint." In: *Tailings Disposal Today*, Proceedings of the First International Tailings Symposium, Tucson, Arizona, October 31, November 1, 2 and 3, 1977. C.L. Aplin and G.O. Arsall Jr. (Editors).
- California Mining Association. 1991. *Mine Waste Management*. Sacramento, CA.
- Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET). 1977. *Pit Slope Manual*. Chapter 9: Waste Embankments.
- Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program. 1993 (March 9). *1992 Annual Report*. CANMET, Toronto.
- Canadian Geotechnical Society. 1989. "Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage." Proceedings of a conference held May 26, 1989, Vancouver, British Columbia.
- Charles River Associates. 1985. "Estimated Cost to the U.S. Mining Industry for Management of Hazardous Solid Waste." CRA Report to the U.S. Environmental Protection Agency #730.
- U.S. Army Corps of Engineers. 1974. "National Dam Safety Program, Proposed Guidelines for Safety Inspection of Dams." *Federal Register* Vol. 39, No. 168 (Aug. 28), p. 31331-31346.
- Das, B.M. 1990. *Principles of Geotechnical Engineering*, Second Edition. PWS-Kent Publishing Corp., Boston, Massachusetts.
- Dougherty, E.R. 1990. *Probability and Statistics for the Engineering, Computing, and Physical Sciences*. Prentice Hall: New Jersey, 800 pages.
- Doyle, F.M. (ed.). 1990. "Mining and Mineral Processing Wastes: Proceedings of the Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes, Berkeley, CA, May 30 - June 1, 1990." Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado.



- Environment Canada; Mining, Mineral and Metallurgical Processes Division. 1987 (December). *Mine and Mill Wastewater Treatment*. Report EPS 2/MM/3. Minister of Supply and Services Canada Catalog No. En 49-7/2-3E, ISBN 0-662-15788-5.
- Environment Canada; Mining, Mineral and Metallurgical Processes Division. 1992 (December). *Environment Protection Series: Status Report on Water Pollution Control in the Canadian Mining Industry (1990 and 1991)*. Report EPS 1/MM/4. Minister of Supply and Services Canada Catalog No. En 49-7/2-3E, ISBN 0-662-20062-4.
- Environmental Protection Agency, Huber, W.C. 1993. "Information on the EPA Storm Water Management Model (SWMM) Version 4.2." U.S. EPA, College Station Road, Athens, GA.
- Fetter, C.W. 1980. *Applied Hydrogeology*. Columbus: Charles E. Merrill Publishing Co., 487 pages.
- Ferguson, K.A., I.P.G. Hutchinsom, and R.L. Schiffman. "Water Balance Approaches to Prediction of Seepage from Mine Tailings Impoundments." In: *Seepage and Leakage from Dams and Impoundments*. 1985.
- Gilbert, R.O., 1987, *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Reinhold: New York, 320 pages.
- Giroud, J.P. and R.K. Frobel. 1983. "Geomembrane Products." *Geotechnical Fabrics Report*, Fall, pp. 38-42, {cited in Van Zyl, Hutchison, Kiel, 1988}.
- Hawley, J.R. 1974. "The Use, Characteristics and Toxicity of Mine/Mili Reagents in the Province of Ontario." Ontario Ministry of the Environment, Toronto.
- International Engineering Company. 1986. "Stillwater Tailings Impoundment Engineering Report." Prepared for: Stillwater Mining Corporation, February 1986.
- Inyang, H. 1993. Personal Communication with Chris Long, SAIC, August 1993, concerning safety factors.
- Kealy, C.D. and R. Busch. Undated. "Evaluation of Mine Tailings Disposal."
- Klohn, E.J. 1981a. "Geotechnical Investigations for Siting Tailings Dams - Design and Construction of Tailings Dams." *Proceedings of a Seminar November 6-7, 1980, Golden, Colorado*.
- Klohn, E.J. 1981 b. "The Development of Correet Tailings Dam Design and Construction Methods-Design and Construction of Tailings Dams." *Proceedings of a Seminar November 6-7, 1980, Golden, Colorado*.

- Lighthall, P.C. 1987. "Innovative Tailings Disposal in Canada." *International Journal of Surface Mining* 1.
- Lighthall, P.C., B.D. Watts and S. Rice. 1989. "Deposition Methods for Construction of Hydraulic Fill Tailings Dams." In: *Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage*. The Vancouver Geotechnical Society, Vancouver, British Columbia, May 26, 1989.
- McWhorter, D. and J. Nelson. 1979. "Unsaturated Flow Beneath Tailings Impoundments," *Journ. Geotech. Div., ASCE*, Vol. 105, #GT11, p. 1317-1334.
- Mittal, H.K. and R. Hardy. 1977. "Geotechnical Aspects of a Tar Sand Tailings Dike." ASCE Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials.
- Mittal, H.K. and N.R. Morgenstern. 1977. "Design and Performance of Tailings Dams." ASCE Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials.
- Mittal, H.K. and N.R. Morgenstern. 1975. "Parameters for the Design of Tailings Dams." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 13, p. 277-293.
- Mittal, H.K. and N.R. Morgenstern. 1976. "Seepage Control in Tailings Dams." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 12, pp. 235-261.
- Parsons, M.L. 1981. "Groundwater Aspects of Tailings Impoundments, Design and Construction of Tailings Dams." Proceedings of a Seminar November 6-7, 1980, Golden, Colorado.
- Randol International Ltd. 1985. *Water Management and Treatment for Mining and Metallurgical Operations*. Randol International Ltd., Golden, CO.
- Ritcey, G.M. 1989. *Tailings Management: Problems and Solutions in the Mining Industry*. Elsevier Science Publishers, B.U. Amsterdam, The Netherlands.
- Ritcey, G.M. and M. Silver. 1987. Deep Water Disposal of Pyritic Tailings - A Simulation. Unpublished data from CANMET.
- Robinsky, E. 1979. "Tailings Disposal by the Thickened Discharge Method for Improved Economy and Environmental Control." Proceedings, 2nd Int. Tailing Symp., Argall, G. (ed.), Miller Freeman, San Francisco, pp. 75-95.
- Ross-Brown, D.M. 1979. "Final Pit Limit Slopes - Analytical Design." Open Pit Mine Planning and Design. American Society of Mining Engineers.
- Schabel, P. and H. Seed. 1973. "Accelerations in Rock for Earthquakes in the Western United States." *Bull. Seis. Soc. of Am.*, Vol. 63, No. 2, pp. 501-516.

- U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Science. 1964. *SCS Engineering Handbook*, Section 4: Hydrology.
- Smith, E.S. 1972. "Tailings Disposal -Failures and Lessons." *Tailing Disposal Today*, Proceedings of the First International Tailing Symposium, Tucson, Arizona.
- Soderberg, Roy L. 1977. "Design Guide for Metal and Nonmetal Tailings Disposal." Information Circular No. 8755. United States Department of the Interior, Bureau of Mines. 1977.
- Swaisgood, J.R., and G.C. Toland. 1972. "The Control of Water in Tailings Structures." *Tailings Disposal Today*, Proceedings of the First International Tailing Symposium, Tucson, Arizona.
- United States Department of the Interior, Bureau of Mines. 1992. "RCRA Regulation Impact on Alaska Mineral Development—Tailings Management." Prepared by Steffen, Robertson, and Kirsten, Inc., Denver, Colorado, May 1992.
- van Zyl, D.J.A., I.P.G. Hutchison, and J.E. Kiel, 1988. *Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects*. Society of Mining Engineers, Inc., Littleton, Colorado.
- Vick, S.G. 1990. *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.
- Volpe, R. and W.E. Kelly. 1985. *Seepage and Leakage from Dams and Impoundments*. American Society of Civil Engineers.
- Williams, M. 1979. "Tailing Dam Failure Case History." Proceedings, 2nd Int. Tailing Symp., Argall, G. (ed.), Miller Freeman, San Francisco, pp. 428-433.