

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Para dar inicio a este capítulo, es necesario proporcionar dos definiciones para introducir al lector en el tema.

Presas o depósitos para jales. Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición de los jales cuya construcción y operación ocurren simultáneamente (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

Jales. Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

2.1. MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

Existen diversos métodos de construcción para los depósitos de jales. Los principales y más utilizados son el de "aguas arriba" y "aguas abajo" con sus variantes según la manera en que se depositen los jales; con hidrociclones o espigas o, si es necesario, combinar métodos o incluso colocar algún enrocamiento. En seguida se describen, de forma muy general, algunos de estos métodos.

2.1.1. Concentración de sólidos

Este método fue introducido por el Dr. Eli Robinsky en 1968 para reducir el impacto ambiental asociado a los métodos tradicionales. Su objetivo consistió en crear un cerro de jales autoportado eliminando la necesidad de una cortina contenedora y el estanque de agua clarificada. El método permite ir restaurando las áreas donde se depositó el jal, aún cuando esté operando el depósito (figura 2.1.).

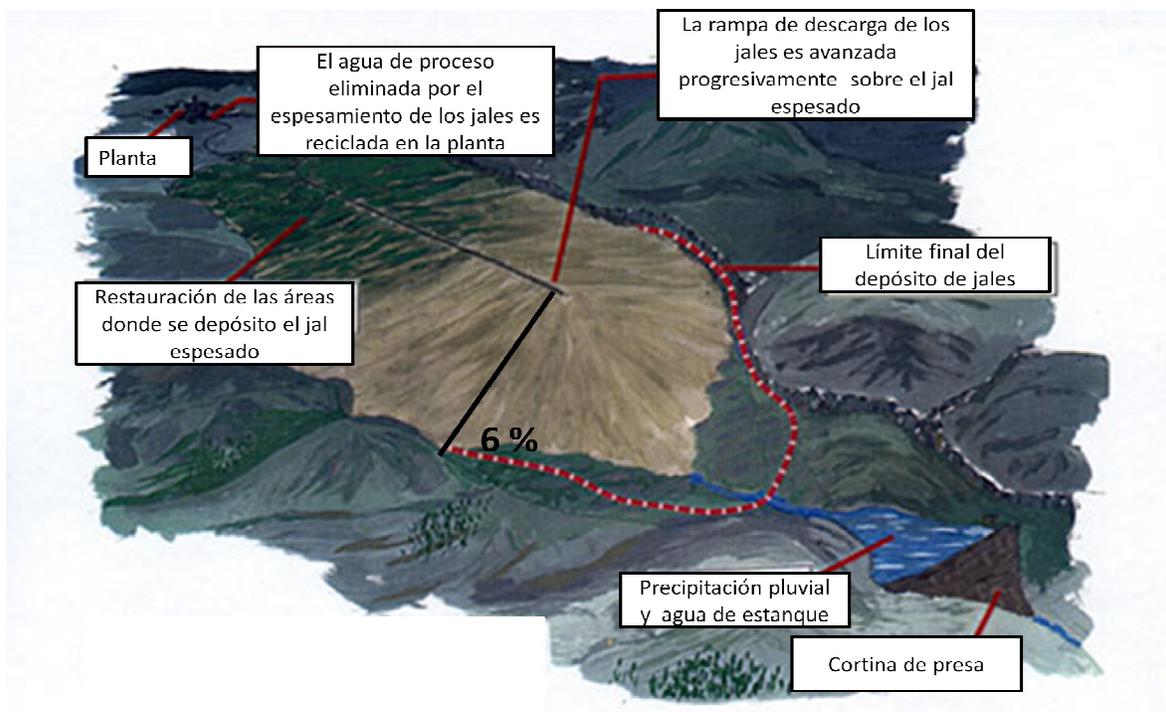


FIGURA 2.1. Método de concentración de sólidos
(<http://www.thickenedtailings.com>).

Se recomienda que los jales depositados lleven de un 50 a un 70 % de sólidos; las pendientes de inclinación recomendadas van del 2 al 6 %. En caso de no contar con una topografía alta para descargar los jales, se puede iniciar con una rampa de descarga con pendiente positiva e ir avanzándola hasta alcanzar la pendiente del 6 % (figura 2.1.) o emplear una torre vertical perforada (figura 2.2).

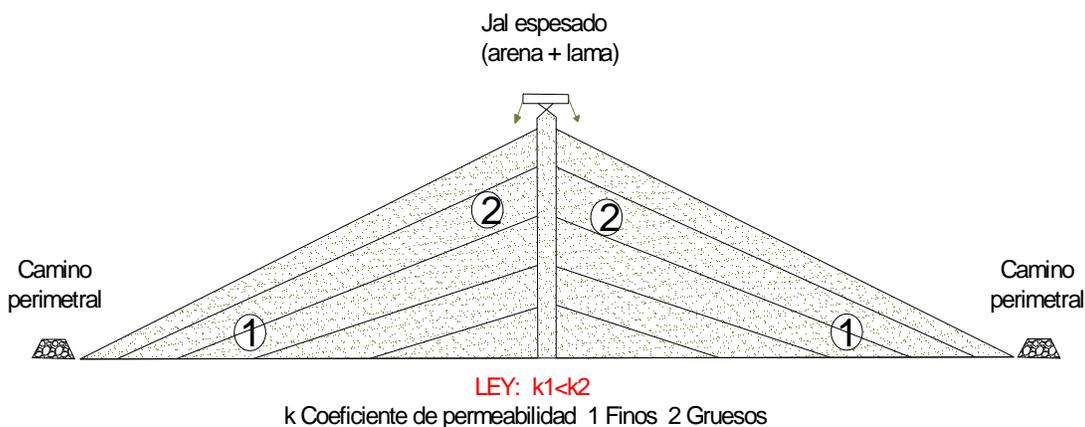


FIGURA 2.2. Método de concentración de sólidos
(NOM-141-SEMARNAT-2003).

2.1.2. "Aguas arriba" con arena cicloneada

El método consiste en ir desplazando la cortina contenedora hacia el vaso de almacenamiento (cortina "aguas arriba") conforme se incrementa la altura del depósito. Para lograr este objetivo, se emplean hidrociclones que clasifican el material en dos: el material descargado por el ápex, que contiene las partículas gruesas y poca agua; y la descarga del vórtex, que se forma por partículas finas y con mayor cantidad de agua. Las partículas gruesas son las que van formando la cortina y las finas se depositan en el vaso de almacenamiento (figura 2.3).

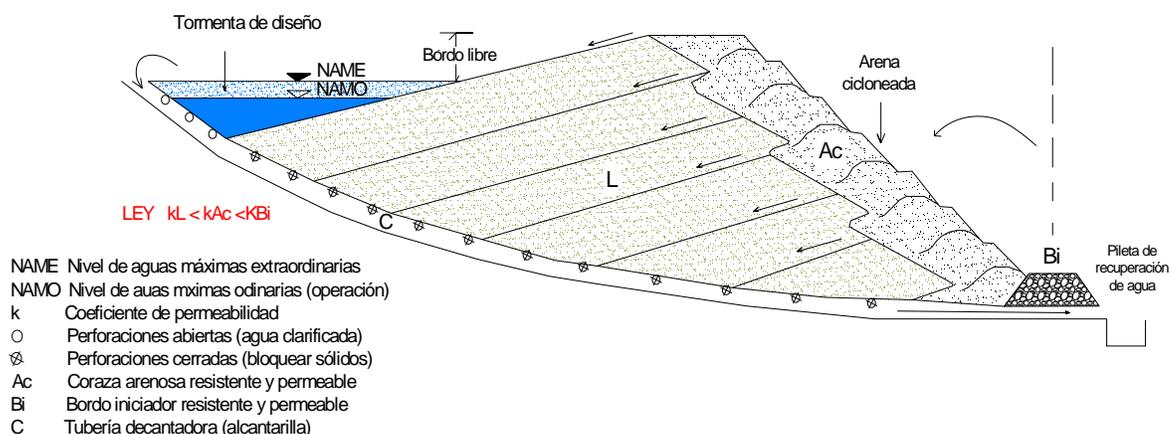


FIGURA 2.3. Método "aguas arriba" con arena cicloneada
(NOM-141-SEMARNAT, 2003).

2.1.3. "Aguas arriba" con espigas

Los jales son depositados hacia el vaso de almacenamiento. El método difiere del anterior en el sistema empleado para descargar los jales. Puesto que se emplean espigas (tubos de descarga libre), lo que permite que las partículas más gruesas se depositen primero seguidas por partículas de menor tamaño, y al último el material fino. La separación de estos materiales depende la densidad y de la granulometría del jal. La descarga con espigas permite una separación natural de los jales, aumentando la estabilidad del depósito, ya que el material más grueso se deposita en las zonas exteriores favoreciendo la filtración. El material depositado en las zonas interiores es más impermeable lo que da por resultado una zona saturada lo que produce un manto freático más bajo que en el caso de un depósito para jales homogéneos (Manual de presas y depósitos de jales, 1993) (figura 2.4).

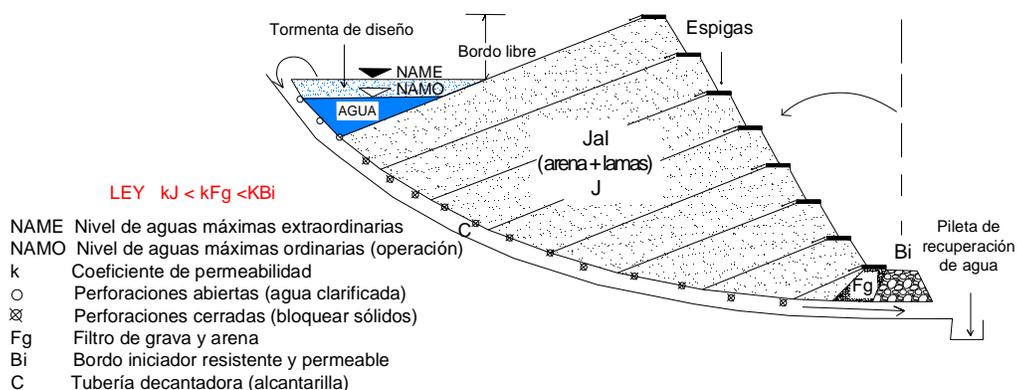


FIGURA 2.4. Método "aguas arriba" con espigas
(NOM-141-SEMARNAT, 2003).

Los depósitos de jales "aguas arriba" son los más empleados, debido a las ventajas que ofrecen entre las que se pueden destacar:

- Son los más económicos.
- Entran en operación en menor tiempo debido a que su estructura básica se construye fácilmente.
- Si la pulpa contiene una cantidad suficiente de arenas y las playas son largas, se forma fácilmente una cortina estable y del tamaño requerido.

Algunas de las desventajas que se presentan son:

- Las capas construidas posteriormente se depositarán sobre material granular fino, depositado en etapas anteriores.
- En este tipo de depósitos la estabilidad de la cortina contenedora es inversamente proporcional a la altura, lo que nos lleva a limitar la altura final.
- Conforme se incrementa la altura de la cortina, se reduce el espacio de almacenamiento del vaso.

Para los casos de donde, el depósito es transversal al vaso de almacenamiento y tiene una boquilla estrecha en el bordo iniciador, con un frente pequeño y un embalse que aumenta en longitud y se ensancha conforme se incrementa la altura, permitiendo playas más largas es posible construir depósitos de jales "aguas arriba" aún cuando los jales sean muy finos (90 % < 0.074 mm).

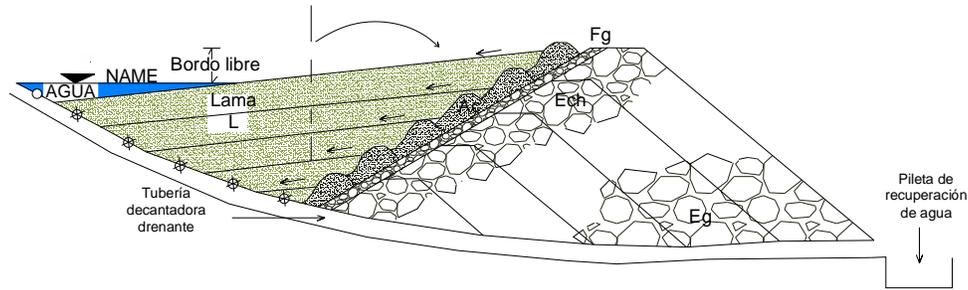
Por el contrario, para el caso de un vaso de almacenamiento ancho con un frente largo y un embalse corto, o con diques en todo su alrededor, no es conveniente construir un depósito "aguas arriba" aún con gran presencia de jales gruesos (60% >0.074 mm), ya que las arenas no serían suficientes para la formación de una coraza a todo lo largo del frente de la cortina contenedora.

El bordo iniciador debe ser permeable. Se puede prolongar una capa ligeramente hacia el estanque lo que da por resultado que el estanque y la zona de material fino se encuentren más alejadas del bordo iniciador. Al mismo tiempo que drenan los jales y baja el nivel piezométrico en el depósito. La altura de este tipo de depósitos puede aumentarse, aún ya alcanzada su altura crítica, sobrecargando el talud "aguas abajo" con material de préstamo.

2.1.4. "Aguas abajo" con enrocamiento

Este método se utiliza en zonas donde las condiciones sísmicas sean críticas.

Consiste en ir desplazando la cortina contenedora hacia "aguas abajo", conforme se incrementa la altura, además de que simultáneamente se debe ir colocando el enrocamiento, tal y como se muestra a continuación (figura 2.5).



$$\text{LEY } k_L < k_{Ac} < k_{Fg} < k_{Ech} < k_{Eg}$$

NAME	Nivel de aguas máximas extraordinarias	Fg	Filtro de grava y arena
k	Coefficiente de permeabilidad	Ac	Arena cicloneada
○	Perforaciones abiertas (agua clarificada)	Ech	Enrocamiento chico
⊗	Perforaciones cerradas (bloquear sólidos)	Eg	Enrocamiento grande

FIGURA 2.5. Método "aguas abajo" con enrocamiento
(NOM-141-SEMARNAT, 2003)

2.1.5. "Aguas abajo" con chimenea y delantal

Cuando se dispone de suelo en cantidades suficientes como para construir una cortina contenedora compacta e impermeable, es recomendable construir algunas obras de drenaje tales como: una chimenea central con delantal y un dren al pie del talud externo (figura 2.6).

Los materiales para construir la cortina deben reunir los siguientes requisitos:

- Volumen apropiado al tamaño del depósito.
- Calidad adecuada de los diversos materiales.
- Facilidad extractiva.
- Apropiada distancia de acarreo.

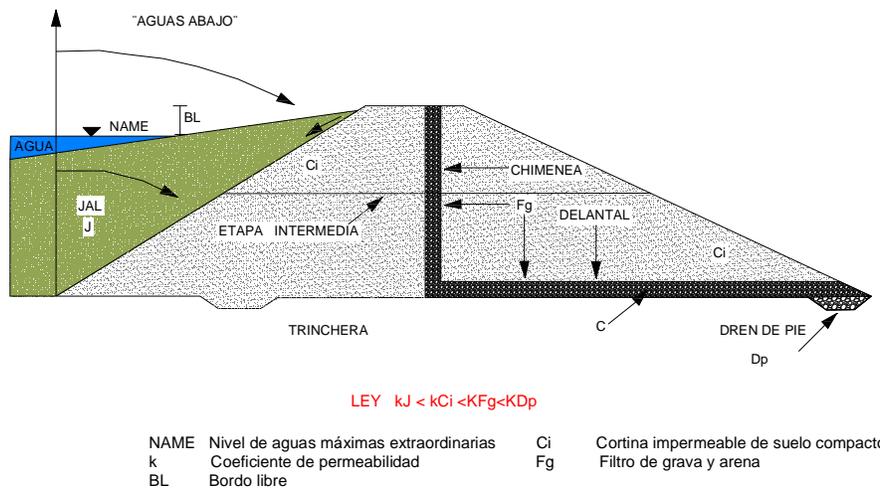
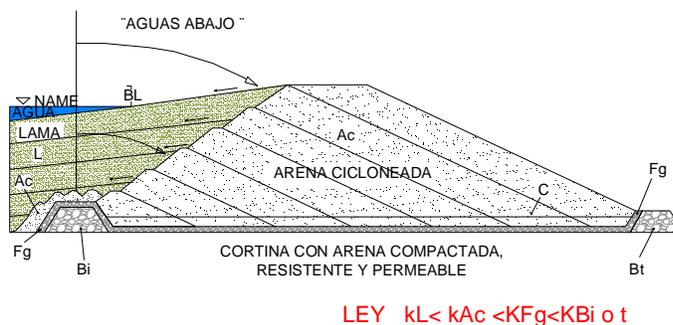


FIGURA 2.6. Método "aguas abajo" con chimenea y delantal
(NOM-141-SEMARNAT, 2003).

2.1.6. "Aguas abajo" con arena cicloneada y compactada

Consiste en ir formando la cortina contenedora a partir del vaso de almacenamiento hacia afuera, mediante arena de ciclón compactada. La cortina contenedora va del bordo iniciador hacia arriba y hacia afuera hasta topar con el bordo terminal.



NAME	Nivel de aguas máximas extraordinarias	Bt	Bordo terminal resistente y permeable
k	Coefficiente de permeabilidad	C	Tubería decantadora drenante
BL	Bordo libre	Fg	Filtro de grava y arena
Bi	Bordo iniciador resistente y permeable		

FIGURA 2.7. Método "aguas abajo" con arena cicloneada y compactada
(NOM-141-SEMARNAT, 2003)

Algunas de las ventajas de los métodos "aguas abajo" son:

- Conforme se incrementa la altura, se incrementa también la capacidad de almacenamiento del depósito.
- Son más resistentes.
- Se tiene un adecuado manejo del agua.

Las desventajas del método aguas abajo son:

- Mayor costo.
- Mayor cantidad de material grueso

2.1.7. "Aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento y arena cicloneada

Este método constructivo consta de dos componentes:

Cortina de enrocamiento

Consiste en colocar el enrocamiento por volteo y extendido con trascabo. A partir del bordo iniciador se colocará un filtro, posteriormente el enrocamiento de tamaño chico, enseguida mediano, y finalmente el enrocamiento grueso, hasta llegar a la cara "aguas abajo" como se muestra en la figura 2.8. Bajo esta distribución granulométrica se cumple con la ley de permeabilidades que marca la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Una vez construido el bordo iniciador, se inicia el vaciado de los jales. Los jales gruesos deben quedar en contacto con el filtro, cara "aguas arriba", manteniendo el bordo libre.

Cortina "aguas abajo" y "aguas arriba"

Se aplica el procedimiento descrito para la cortina de enrocamiento hasta una cierta altura y después se continúa de la siguiente forma:

A partir de la altura definida se continúa con jales "aguas arriba", partiendo de la esquina del lado "aguas arriba" de la corona, como se ilustra en la figura 2.8. Es necesario ir construyendo el bordo con jales gruesos por medio de cicloneo.

Para el caso de jales depositados con hidrociclones, la resistencia al esfuerzo cortante es mayor, con valores de 30 a 40° de ángulo de fricción interna (Manual de presas y depósitos de jales, 1993).

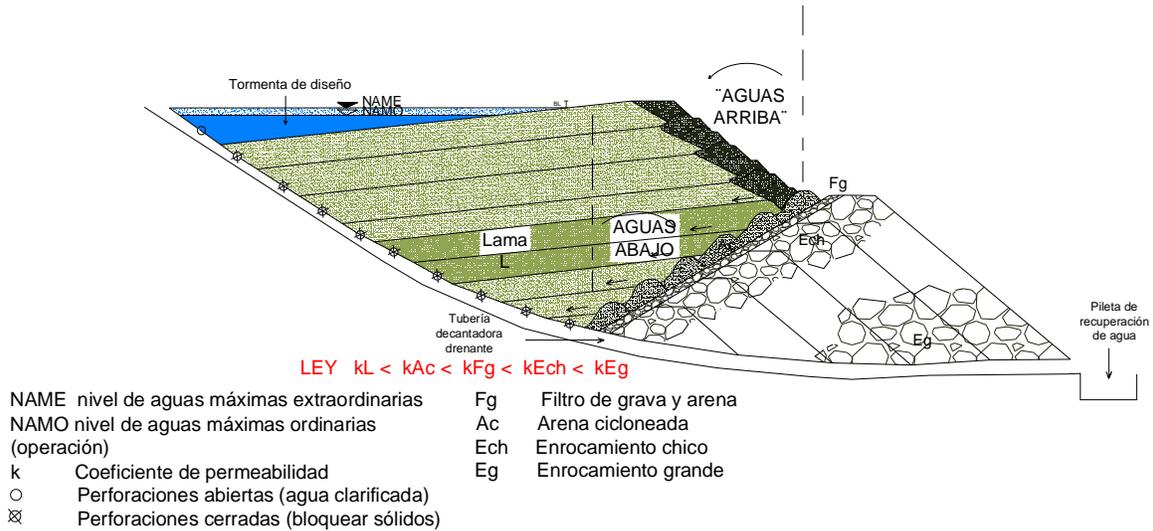


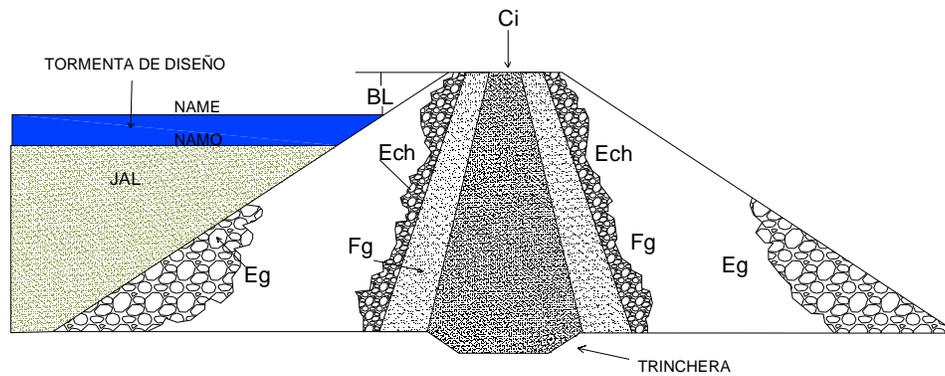
FIGURA 2.8. Método "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento y arena cicloneada (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

2.1.8. Presa convencional sección graduada

Su procedimiento de construcción corresponde al de una cortina para almacenamiento de agua (figura 2.9). Este método se ha utilizado en México, pero los costos y la recurrente necesidad de sobreelevar las cortinas representa una limitante.

Este tipo de presa se utiliza cuando los jales son muy finos y la velocidad de incremento del nivel de jales es excesiva respecto del tiempo de llenado de cada etapa sucesiva en cualquiera de los métodos de construcción ya mencionados.

Una presa preconstruida es más segura y conveniente, pero por lo general más costosa que una construida y operada simultáneamente.



$$\text{LEY } k_J < k_{Ci} < k_{Fg} < k_{Ech} < k_{Eg}$$

NAME	Nivel de aguas máximas extraordinarias	Ci	Coraza impermeable
NAMO	Nivel de aguas máximas ordinarias (Operación)	Fg	Filtro de grava y arena
k	Coefficiente de permeabilidad	Ech	Enrocamiento chico
BL	Bordo libre	Eg	Enrocamiento grande

FIGURA 2.9. Depósito convencional sección graduada
(NOM-141-SEMARNAT, 2003).

2.2. ELEMENTOS BÁSICOS QUE COMPONEN UN DEPÓSITO PARA JALES

Un depósito para jales tiene cuatro elementos básicos que son:

- La cortina contendora
- El vaso de almacenamiento
- El sistema decantador drenante
- El vertedor de excedencias

2.2.1. Cortina contendora

Es la estructura resistente que delimita y soporta el empuje de los jales y del agua almacenada. Durante la formación de la cortina contendora se deja un *bordo libre* que es la diferencia de elevaciones entre la corona de la cortina contendora y el nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME). A la estructura inicial de la cortina contendora se le denomina *bordo iniciador* (NOM-141-SEMARNAT, 2003).



FIGURA 2.10. Cortina contenedora (arriba) y bordo libre (abajo), depósito para jales minera La Negra

2.2.2. Vaso de almacenamiento

Elemento de la presa que tiene volumen disponible para almacenar los sólidos (jales), una porción de agua empleada en su transporte y el parte del agua pluvial que caen dentro de la presa (NOM-141-SEMARNAT, 2003). Durante la operación de la presa se forma un espacio que existe entre la corona de la cortina contenedora y el nivel de aguas máximas ordinarias o de operación (NAMO), al cual se le denomina *playa* y a la parte donde se sedimenta el jal y se acumula el agua se le llama *espejo de agua decantadora* o *estanque de agua clarificada*.



FIGURA 2.11. Vaso de almacenamiento depósito para jales minera la Negra

2.2.3. Sistema decantador drenante

Se define como una obra de ingeniería que tiene por objeto captar el agua de los jales y enviarla a la pileta de recuperación. También puede utilizarse como vertedor de excedencias para desalojar el agua de la tormenta máxima probable (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

Puede ser de tipo sección portal, con muros de mampostería y bóveda de concreto reforzado, o bien, conducto circular o cuadrado de acero o concreto reforzado. La alcantarilla tiene perforaciones para la recuperación del agua clarificada que se reutiliza en el proceso de la planta de beneficio. Otro elemento comúnmente empleado es la torre decantadora que permite colectar el agua del estanque (figura 2.12.).

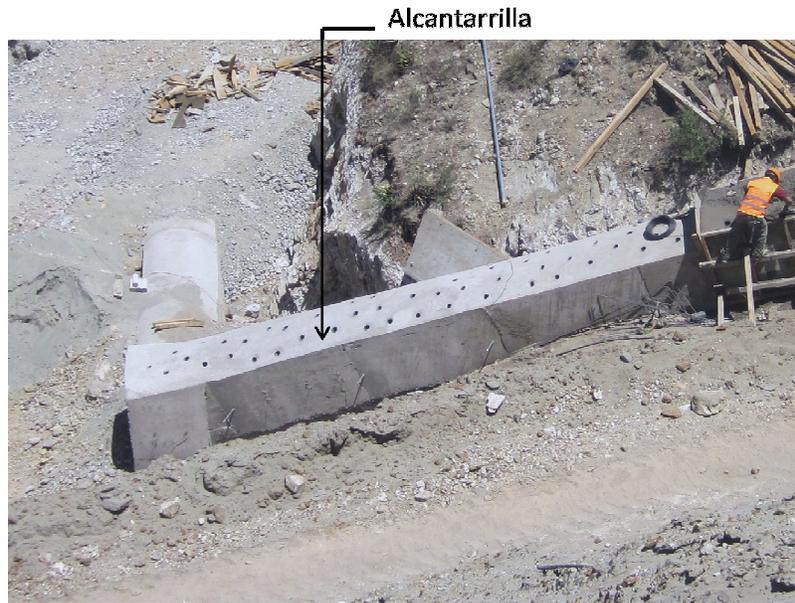


FIGURA 2.12. Sistema decantador drenante

2.2.4. Vertedor de excedencias

Obra de ingeniería que tiene como propósito proveer un medio de control de los escurrimientos normales y extremos, para desalojar con seguridad la tormenta de diseño de la presa (NOM-141-SEMARNAT, 2003). El vertedor de excedencias final es aquel que desvía el agua hacia afuera del depósito.

2.3. CONCEPTOS BÁSICOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO

La parte medular en el diseño de un depósito para jales consiste en la selección apropiada del lugar para su construcción. La exploración de los posibles sitios, proporciona al ingeniero proyectista el conocimiento de todos los elementos necesarios para la selección del mejor sitio que responda a los criterios impuestos por la economía, la estabilidad de la cortina y la seguridad del medio ambiente.

En general, para el diseño de un depósito para jales es necesario conocer, las características de los jales, los materiales disponibles para su construcción y los factores específicos del sitio (fisiografía, hidrología, topografía, geología y sismicidad). En cuanto a los jales y materiales de préstamo las características a evaluar son sus propiedades índices y mecánicas.

A continuación se explican algunos de los conceptos básicos que se deben tomar en cuenta para la selección del sitio.

2.3.1. Fisiografía

Para llevar a cabo el diseño de un depósito para jales es importante conocer la forma del terreno, la evolución de su relieve, la ubicación del sitio de estudio, la superficie con la que se dispone, el clima y la precipitación, temperatura y evaporación media anual que determinan algunas de las características del depósito a diseñar.

2.3.2. Hidrología

El depósito para jales debe ser capaz de controlar la tormenta de diseño, el no considerarlas en el diseño puede dar por resultado una ruptura de la cortina, con liberación de agua pluvial, jales y agua de proceso. Se debe determinar la cantidad de escurrimiento a manejar y proponer un medio de control. Lo más recomendable es desviar el agua del vaso de almacenamiento y minimizar los flujos hacia adentro de éste. Es posible lograrlo mediante la ubicación del embalse lo más cerca a la cabecera de la cuenca de drenaje, además, de que se minimizan los costos de la construcción de las estructuras que desvían el agua de superficie.

La NOM-141-SEMARNAT 2003, pide se realicen estudios del agua superficial y subterránea que se indican en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Estudios para agua superficial y subterránea (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

Agua superficial	Agua subterránea
Delimitar la subcuenca	Evaluar la vulnerabilidad de acuíferos en caso de existir
Calcular el volumen medio anual de lluvia	
Calcular el área de inundación	Verificar la existencia de aprovechamientos hidráulicos
Determinar la calidad del agua	

La norma antes mencionada divide al territorio mexicano en tres zonas: ciclónica, húmeda y seca; y establece una altura mínima de bordo libre de 3 m en zonas ciclónicas, de 2 m en zonas húmedas y de 1 m en zonas secas.

2.3.3. Topografía

La topografía natural es una de las principales consideraciones para establecer la capacidad de almacenamiento. Se pretende aumentar la relación: *volumen almacenado/volumen de la estructura de retención*, que puede resultar baja en terrenos de lomerío y alta en terrenos montañosos. El lugar elegido para la construcción del depósito debe minimizar la cantidad de material de préstamo o incluso diseñar sin necesidad de éste.

Por otro lado, se recomienda mantener las alturas de cortinas debajo de los 60 m. Las cortinas con alturas mayores a 120 m pueden causar problemas de construcción y diseño que podrían evitarse con una adecuada selección del sitio para la edificación del depósito de jales (Environmental Protection Agency -EPA, 1994).

Otro punto importante por considerar es la gran influencia de la topografía en la hidrología del sitio.

La topografía debe permitir una elevación controlada anual de jales detrás de la cortina. El efecto, en caso de falla del depósito debe ser considerado, así como los límites físicos y económicos del daño a vidas y propiedades. En la siguiente tabla, se muestra una clasificación de los depósitos para jales de acuerdo a los daños que una falla pudiera llegar a ocasionar (Manual de presas y depósitos de jales, 1993).

Tabla 2.2. Clasificación por peligro potencial (U.S. Army Corps of Engineers).

Categoría	Pérdidas de vidas	Pérdidas económicas
Baja	No se prevé ninguna (ninguna estructura permanentemente habitada por personas)	Mínimas (sin desarrollo pocas estructuras o agricultura)
Significativa	Pocas (No hay desarrollos urbanos y sólo un número pequeño de estructuras no habitadas)	Apreciable (agricultura, industria o estructuras)
Alta	Numerosas	Excesivas (grandes comunidades, industrias o agricultura)

La NOM-141-SEMARNAT 2003, establece los parámetros para clasificar el terreno en estudio en plano, lomerío y montañoso.

2.3.4. Geología y agua subterránea

Una vez evaluados los parámetros fisiográficos, hidrológicos y topográficos, el número de sitios para construir el embalse se ha reducido. En este momento las consideraciones geológicas asumen un rol crítico, particularmente si la situación geológica afecta los cimientos de la cortina, los rangos de filtración y la disponibilidad de los materiales de préstamo para la construcción de la cortina.

Aunque los detalles geológicos son críticos para la ubicación y diseño, a menudo juegan un papel secundario en las decisiones de ubicación. Esto porque usualmente hay un número limitado de sitios disponibles y la falta de información detallada hace casi imposible alguna comparación significativa de sitios alternos. Lo que se busca es tratar de diseñar alrededor de cualquier problema geológico (alta permeabilidad, baja resistencia, fractura, falla, alta deformabilidad, etc.) aunque sí se presenta un problema crítico para el diseño se abandona el sitio y se continúa buscando el sitio idóneo. Es importante verificar que no exista mineral que pueda ser explotado rentablemente debajo un depósito para jales.

Las condiciones de agua subterránea están a menudo relacionadas con la geología, y también afectan las condiciones del sitio. Un nivel de aguas freáticas alto limita la cantidad de material de préstamo seco disponible para la construcción.

El sitio propuesto será investigado geotécnicamente. La investigación evaluará la geología del sitio, incluyendo la profundidad, espesor, continuidad y composición del estrato, hidrogeología del sitio, propiedades geotécnicas del suelo y las rocas que afectan el diseño y la disponibilidad del material adecuado para la construcción de la cortina, enrocamiento, filtros desagües y revestimientos impermeables.

2.3.5. Características del material de cimentación

Las propiedades geotécnicas de este material deben evaluarse, con el propósito de conocer la capacidad de carga del terreno, la permeabilidad, la cohesión, ángulo de fricción interno, los esfuerzos y deformaciones a los que se verá expuesto el terreno de cimentación con el incremento de la altura de la cortina.

Deben tomarse muestras inalteradas y realizar ensayos para evaluar sus propiedades geotécnicas, tales como la granulometría, resistencia al esfuerzo cortante, cohesión, densidad, contenido de agua y clasificación de acuerdo con el Sistema Unificado para la Clasificación de los Suelos (SUCS). Los desperdicios del desmonte, en caso de ser utilizados para la construcción de la presa, deben ser ensayados para determinar sus propiedades geotécnicas, aunque lo más recomendable es no usarlos. Deberán excavar pozos a cielo abierto dentro del área para el depósito y realizar muestreos para determinar si el material puede ser utilizado para la construcción de la cortina. Es importante conocer la clase y el volumen de los diversos materiales disponibles.

2.3.6. Efecto sísmico

Los depósitos para jales deben proyectarse para resistir el máximo sismo probable en el lugar. La magnitud, la distancia del lugar y la profundidad del máximo sismo registrado deben considerarse, y a partir de estos datos, podrá predecirse su aceleración máxima en lecho rocoso.

2.3.7. Método constructivo

Las características mecánicas de los jales almacenados dependen de la manera en que son depositados, es por ello importante la adecuada selección del método constructivo.

La NOM-141-SEMARNAT-2003, maneja una tabla de clasificación de los depósitos de jales en la República Mexicana de acuerdo con las condiciones topográficas, hidrológicas y sísmicas. De conformidad con esta tabla, se indica el método constructivo idóneo para cada sitio, el tipo de sistema decantador drenante, el monitoreo y el método a emplear para llevar a cabo el análisis de estabilidad.

Una vez seleccionado el método constructivo del depósito de jales, el ingeniero deberá determinar el tamaño, la altura, el procedimiento de operación y la ingeniería de detalle.

2.4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad permiten evaluar las condiciones de estabilidad de los taludes mediante el cálculo del factor de seguridad. Dicha estabilidad está condicionada por factores geométricos (como la altura e inclinación del talud), factores geológicos (material de cimentación), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y geotécnicos (propiedades mecánicas de los jales y del basamento). Para que el ingeniero encargado del análisis defina las medidas para evitar una falla debe evaluar cada uno de estos factores. En general se sabe que los taludes formados con jales fallan a favor de superficies curvas, en algunas ocasiones la existencia de capas de diferente competencia pueden dar lugar a una rotura en forma de superficie plana o poligonal, tal como se muestra gráficamente en la figura 2.13.

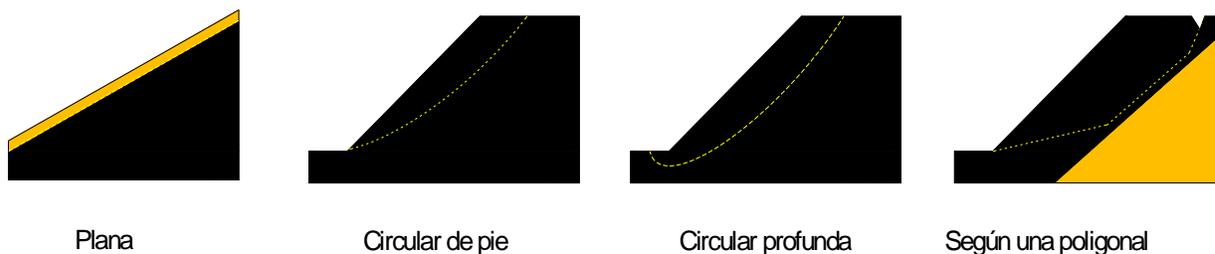


FIGURA 2.13. Tipos de falla que se pueden presentar en taludes

(González *et al.*, 2002).

El agua es uno de los mayores enemigos de la estabilidad de los taludes. Su presencia reduce la resistencia al corte de los planos de rotura al disminuir la tensión normal efectiva, aumentando el peso del material por saturación y erosionando internamente el material debido al flujo.

El plano de falla en un talud depende de la resistencia al corte del mismo, esta resistencia a su vez viene dada por la cohesión y el ángulo de fricción interna, además del peso volumétrico del material, la distribución del material y la geometría del talud.

Otros factores que influyen en la estabilidad del talud son las cargas estáticas y dinámicas, la precipitación y el estado tensional en que se encuentre la masa en estudio.

En la siguiente tabla se presentan algunas definiciones de diversos autores del factor de seguridad.

Tabla 2.3. Definiciones del factor de seguridad (Quezada, 2006).

Autor	Definición de factor de seguridad
Fellenius	Cociente entre la resistencia al cortante disponible en la superficie de deslizamiento y la resistencia al cortante requerida para mantener el equilibrio en la masa deslizante o como la relación entre el momento resistente y el actuante.
Culmann	Relación entre fuerzas resistentes y las fuerzas movilizadoras
Rendulic y Jaki	Cociente entre la cohesión disponible y la cohesión requerida para mantener el equilibrio en la masa deslizante.
Taylor	Relación entre la la fricción disponible y la requerida, o como la relación entre la altura crítica y la altura del talud.

Para el diseño se debe elegir un factor de seguridad dependiendo del carácter que tenga el talud y de los costos de ejecución. Para el caso de estudio, el talud es de carácter definitivo. El Manual de Obras Civiles para Diseño por Sismo de la CFE recomienda un factor de seguridad en condiciones estáticas de 1.5 y en condiciones dinámicas de 1.1.

2.4.1. Métodos de equilibrio límite

Los métodos de equilibrio límite analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable comparando las fuerzas que provocan el movimiento contra las fuerzas que se resisten a éste a lo largo de una determinada superficie de rotura. Los métodos de equilibrio límite se basan en: *el criterio de Mohr-Coulomb, en la selección de una superficie teórica de rotura, la definición del factor de seguridad y en que la resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura* (González et al, 2002).

El criterio de Mohr- Coulomb es un criterio lineal que expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura mediante la siguiente expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots(1)$$

donde :

τ Esfuerzo cortante sobre el plano de rotura

σ_n Esfuerzo normal sobre el plano de rotura

c y ϕ cohesión y ángulo de fricción interna

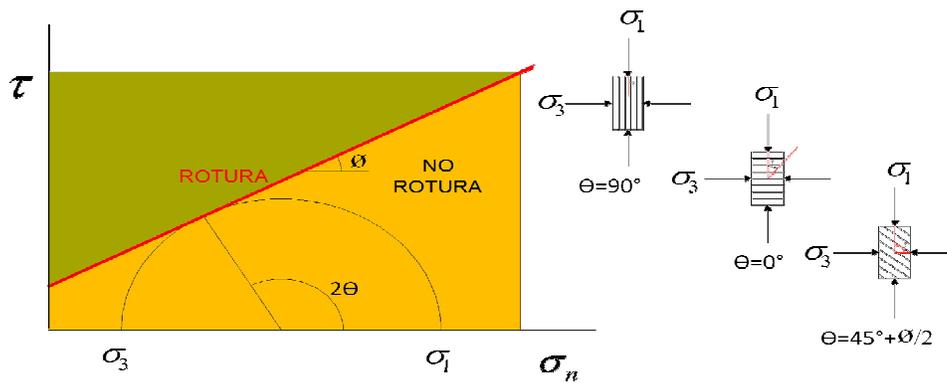


FIGURA 2.14. Criterio lineal de Mohr-Coulomb $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$
(González *et al.*, 2002).

De acuerdo con las consideraciones anteriores, se establecen las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. El resultado del análisis nos proporciona el factor de seguridad para cada una de las superficies analizadas, y se admite como superficie de rotura aquella que tenga el menor factor de seguridad.

Las fuerzas actuantes sobre el plano de rotura, son las debidas al peso del material (W), a la cohesión (c), y a la fricción del plano (ϕ)(figura 2.15). El coeficiente de seguridad se expresa de la forma siguiente:

$$F = \frac{Rc + R\phi}{S} = \frac{\tau}{s} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

Rc = cA =Fuerzas cohesivas

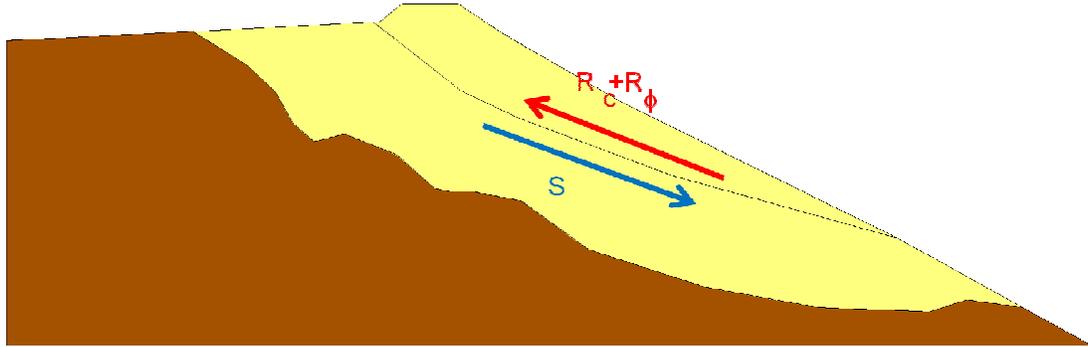
R ϕ = $W \cos \alpha \tan \phi = (W \cos \alpha - U) \tan \phi$ =fuerzas friccionales

S = $W \sin \alpha$ =fuerzas que tienden al desplazamiento

A = Área del plano de rotura

W = Peso

U = Fuerza total debida al agua sobre la superficie A, en caso de existir presión de agua



$$F = \frac{R_c + R_\phi}{S}$$

$F > 1$	Estable
$F \leq 1$	Inestable

FIGURA 2.15. Fuerzas actuando sobre una superficie de rotura

El éxito del análisis de estabilidad de taludes a través de los métodos de equilibrio límite se debe a:

- La introducción de métodos numéricos.
- La idea de dividir la masa potencialmente inestable en dovelas.
- El uso cada vez mayor de las computadoras que hizo posible el empleo de métodos iterativos más rigurosos.
- El conocer si una estructura es estable o no, resulta fundamental en cualquier obra de ingeniería.

En general, a los métodos de equilibrio límite se les puede clasificar de la siguiente manera:

- Talud infinito
- Métodos de las cuñas
- Métodos de la masa total
- Métodos de rebanadas

- *Talud infinito*

Se basa en la hipótesis de que la longitud de una rotura plana superficial paralela al talud puede considerarse infinita con respecto al espesor deslizado (González *et al.*, 2002).

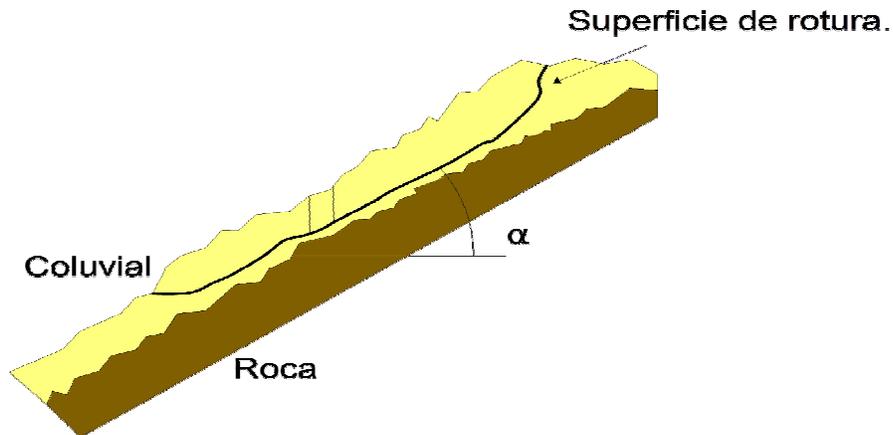


FIGURA 2.16. Método de talud infinito
(González *et al.*, 2002).

Para este método existen los *Ábacos para el cálculo de estabilidad de taludes finitos*, se emplean mediante la definición del coeficiente de presión intersticial r_u , y de los parámetros A y B .

- *Método de las cuñas*

Considera la formación de una superficie de forma poligonal. La masa deslizante se divide en varios bloques mediante líneas verticales para los que se establece el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales (González *et al.*, 2002).

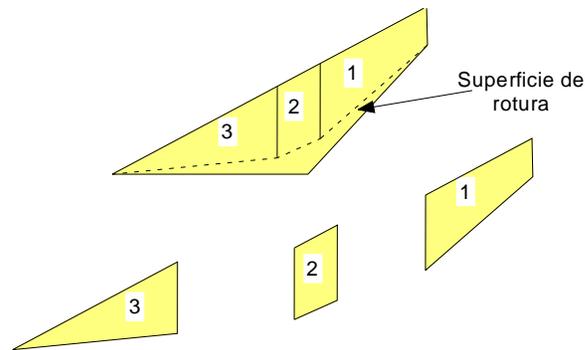


FIGURA 2.17. Método de cuñas
(González *et al.*, 2002).

El coeficiente de seguridad es la relación entre la resistencia tangencial disponible y la requerida para el equilibrio.

El método se aplica de la siguiente manera:

- Suponer una superficie de rotura.
- Dividir la masa deslizante en cuñas.
- Calcular el peso de cada cuña.
- Se supone un valor para el coeficiente de seguridad, F_1 , y se calcula $c_m = c/F_1$ y $\tan\phi_m = \tan\phi/F_1$.
- Se construye el polígono de fuerzas para la última cuña a partir de valor de ϕ_m y suponiendo un ángulo para los empujes entre los bloques, δ , aunque a menudo se considera como 0° .
- A partir de lo obtenido, se establece el equilibrio en el siguiente bloque y así sucesivamente hasta llegar a la primera cuña en el que se calcula la fuerza S necesaria para el cierre del polígono, comprobándose si hay equilibrio para los valores de cohesión y rozamiento interno, c_m y ϕ_m .
- Si hay equilibrio, el coeficiente es F_1 . En caso contrario, se supone otro valor, F_2 , y se inicia nuevamente el cálculo hasta obtener el coeficiente de seguridad de la superficie tomada.
- Se adopta otra superficie poligonal y se inicia el proceso de nuevo, hasta obtener la superficie con menor valor de F (González *et al.*, 2002).

- *Métodos de la masa total*

Supone una superficie de rotura circular en dos dimensiones, esta hipótesis es muy utilizada en la práctica y representa el problema real en taludes de altura finita (González *et al.*, 2002).

Sobre la superficie de rotura se ejercen las siguientes acciones:

- El peso propio (W), de la masa de la rebanada.
- La presión intersticial del agua distribuida a lo largo de la superficie de rotura, con resultante U.
- Un esfuerzo tangencial distribuido sobre la superficie de rotura, de resultante $R_c + R_\phi$.
- Un esfuerzo normal distribuido sobre dicha superficie, de resultante **N**.

Sabemos que $F = \frac{R_c + R_\phi}{S} = \frac{\tau}{s}$, y por la fórmula (1) tenemos que $S = \frac{\tau}{F} = \frac{c}{F} + \sigma_n \frac{\tan\phi}{F}$, por otro lado la resultante debida a la cohesión R_c , viene dada como:

$$R_c = \int_0^\theta \left(\frac{c}{F}\right) d\theta \dots \dots \dots (3)$$

La resultante de esfuerzos normales, **N**, se desconoce su magnitud y posición, aunque debe ser normal a la superficie de rotura supuesta.

La resultante tangencial debida al rozamiento, R_ϕ , debe ser normal a **N** y cumplir con:

$$R_\phi = \sigma_n \frac{\tan\phi}{F} \dots \dots \dots (4)$$

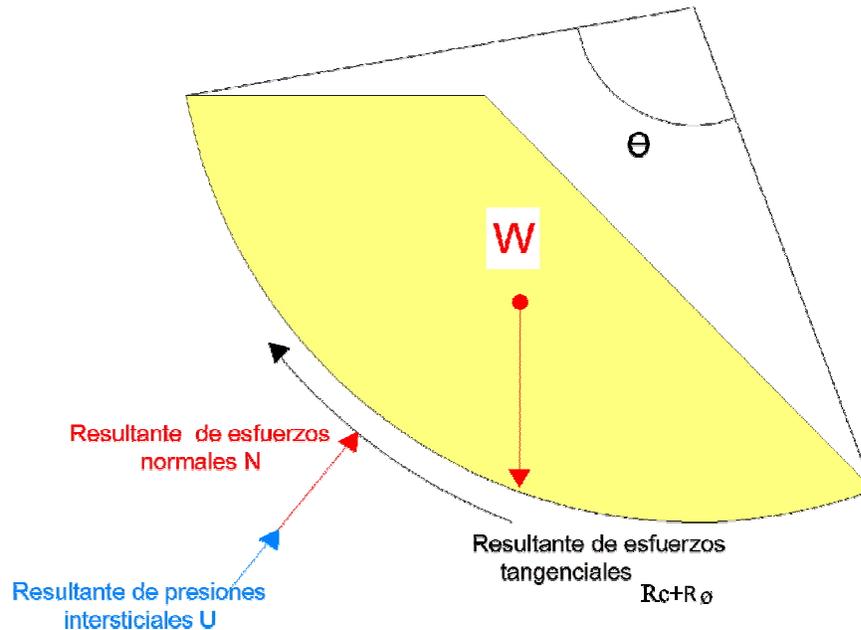


FIGURA 2.18. Fuerzas actuantes en los métodos de masa total

Si el análisis se realiza considerando a c y a ϕ diferentes de cero, es necesario añadir algunas hipótesis para resolver el problema. Taylor admite que la resultante de las fuerzas normales está concentrada en un solo punto, dando lugar al método de Taylor (1948), en el que es necesario realizar diversos tanteos gráficos o analíticos (González *et al.*, 2002).

Basados en el método de Taylor existen los ábacos de Hoek y Bray (1981) que permiten el cálculo del factor de seguridad, a partir de los datos geométricos del talud y de los parámetros resistentes del suelo (González *et al.*, 2002).

- *Métodos de rebanadas*

Sus principios básicos fueron desarrollados por Bishop y supone una superficie de rotura circular, divide la masa deslizante en rebanadas o franjas verticales, establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo. De la condición de equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada obtiene las fuerzas

normales y sustituye en la ecuación resultante de equilibrio de momentos y es así como obtiene la expresión del factor de seguridad (González *et al.*, 2002).

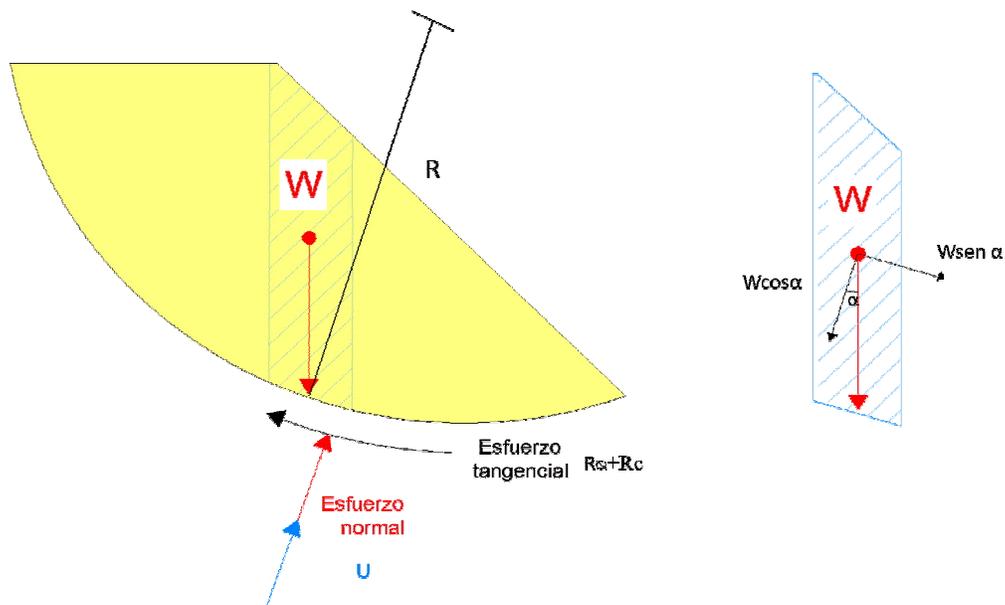


FIGURA 2.19. Métodos de rebanadas

Dentro de estos métodos se encuentran: el de Bishop, Jambu, Morgenstern-Price y Spencer.

A continuación se comparan algunos de los métodos de equilibrio límite más utilizados.

Método simplificado de Janbu

Janbu (1954) desarrolló un método en el cual se satisface el equilibrio de fuerzas en la ecuación del factor de seguridad.

En él, se toman en cuenta las fuerzas normales interdovelas, aunque ignoran las fuerzas cortantes.

Como consecuencia de incluir las fuerzas normales interdovelas, la ecuación se vuelve función del factor de seguridad, dando como resultado una ecuación no lineal.

Ya que solo se analiza el equilibrio de fuerzas en la ecuación del factor de seguridad y se desprecian las fuerzas cortantes interdovelas, no es recomendable usarlo cuando se analizan mecanismos de falla circular (Fredlund, D. G. y John Krahn, 1977).

Método de Bishop simplificado

El método de Bishop (1955) al igual que el de Janbu, toma en cuenta las fuerzas normales interdovelas e ignora las fuerzas cortantes, pero a diferencia de este último, la ecuación del factor de seguridad se satisface mediante la ecuación de suma de momentos, por lo que no es recomendable usarlo cuando se analizan mecanismos de falla plana (Fredlund, D. G. y John Krahn, 1977).

Método de Spencer

Spencer (1967) desarrolló un método con dos factores de seguridad, uno con respecto al equilibrio de fuerzas horizontales y otro con respecto al equilibrio de momentos.

En su método adoptó una relación constante entre las fuerzas normales y cortantes interdovelas y mediante un mecanismo iterativo logra que los factores de seguridad sean iguales, logrando con ello que el equilibrio de fuerzas y momentos quede satisfecho (Fredlund, D. G. y John Krahn, 1977).

Método Morgenstern-Price

En 1965 Morgenstern y Price desarrollaron un método similar al de Spencer, en el cual, la relación entre las fuerzas cortantes y normales interdovelas no necesariamente tiene que ser constante, esto se logra mediante la ecuación (Fredlund, D. G. y John Krahn, 1977):

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

donde:

f(x) función

λ porcentaje (en forma decimal) de la función usada

E Fuerza normal interdovela

X Fuerza cortante interdovela

La función f(x) que gobierna la relación entre las fuerzas cortantes y normales interdovelas, puede tomar varias formas (constante, trapecial, definida por el usuario, etc.).

Método general de equilibrio límite

Un método general de equilibrio límite fue desarrollado por Fredlund (Fredlund, D. G. y John Krahn, 1977), el cual, al igual que el de Spencer, está basado en dos factores de seguridad, uno para el equilibrio de momentos y otro para el de fuerzas.

Además de lo anterior, el método está gobernado por la ecuación de fuerzas interdovelas propuesta por Morgenstern y Price (1965).

Su aportación principal, consistió en proporcionar un marco de referencia para la comparación de los métodos anteriormente analizados ya que homogeniza las ecuaciones que se utilizan para obtener los factores de seguridad, siempre respetando los mecanismos tomados en cuenta en la creación de cada uno de ellos.