

Diseño geotécnico de una presa de jales en el estado de Hidalgo

O. Flores C.
Instituto de Ingeniería, UNAM, México
H. R. Aguilar B.
Sísmica de Suelos, México
L. Reyes S y V. Orozco S
RVO y Cia, México



ABSTRACT

This paper presents the procedure followed for the design of a tailings dam to store 70.2 million m³ of solid waste: the curtain will have a height of 63 m at its maximum section and a length of 2.85 km and the area flooded, for the condition of greater height, will be 203 hectares. Were carried out field and laboratory tests to characterize the tailings as the foundation soil. Proposes three construction methods and determine the safety factors under static and earthquake accidental. Finally, we propose a basic instrumentation and provides some recommendations for closing condition.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el procedimiento que se siguió para el diseño de una presa de jales que almacenará 70.2 millones de m³ de desechos sólidos: la cortina tendrá una altura de 63 m en su sección máxima y una longitud de 2.85 km y el área inundada, para la condición de mayor altura, será de 203 hectáreas. Se ejecutaron pruebas de campo y laboratorio para caracterizar los jales como el suelo de cimentación. Se proponen tres métodos constructivos y se determinan los factores de seguridad en condiciones estáticas y accidentales por sismo. Finalmente, se propone una instrumentación básica y se dan algunas recomendaciones para la condición de cierre.

1 INTRODUCCIÓN

En este documento se describen los trabajos de campo y laboratorio que se ejecutaron para construir el modelo geotécnico del sitio, así como las consideraciones y análisis realizados para el diseño de la cortina de la presa, que almacenará 70.5 millones de metros cúbicos de jales, para lo cual se hizo necesaria una cortina de 2.85 km de longitud y 63 m de altura, en su sección de mayor altura; asimismo, se presentan las consideraciones sobre los tipos de cortina y los procedimientos constructivos recomendables para este proyecto.

Se describe además, el procedimiento constructivo de la cortina para las diferentes opciones propuestas.

Finalmente, se describe una instrumentación básica para la cortina y las recomendaciones generales para el cierre de la presa.

2 CONDICIONES GENERALES DEL SITIO (INEGI, 2010)

El predio donde se construirá la presa de jales se encuentra dentro del municipio de Epazoyucan que abarca una superficie de 144 km² y se localiza entre los paralelos 19° 55' 27.57" y 20° 01' 24.73" de Latitud Norte y los meridianos 98° 37' 03.22" y 98° 43' 22.46". El municipio colinda al Norte con Mineral del Monte y

Omitlán de Juárez; al Sur con Zempoala; al Este con Singuilucán y al Oeste con Mineral de la Reforma.

El clima de la zona de estudio es seco y semiseco a templado. La precipitación media anual es del orden de 390.6 mm/año. La temperatura media anual es de 16 °C y la evaporación potencial, es de 1,650 mm/año, también como valor medio anual.

2.1 Efectos de sitio

Con base en los tipos de temblores que afectan al territorio nacional, se ha propuesto en el Manual de Obras Civiles (MOC, 1993) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) el mapa de zonificación sísmica que el sitio de estudio se ubica en la Zona B, que corresponde con la segunda de menor actividad en todo el país.

Por las características que presentan los suelos del sitio, se considera que corresponden al Tipo de suelo II (MOC, 1993), con periodo fundamental de vibración inferior a 1.0 s y una aceleración máxima en la superficie del orden de 0.08 g.

Se destaca que, siguiendo las recomendaciones para estructuras de contención en México, con fines de diseño se ha incrementado la aceleración de la superficie del terreno en 4/3 para considerar el posible efecto amplificador generado por la cortina de la presa. Bajo este criterio, la aceleración a que estará expuesta la

estructura proyectada por la acción sísmica corresponde a 0.11 g.

3 TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO

Con el fin de conocer los materiales que componen al subsuelo del sitio a lo largo del eje de la cortina, se programaron una serie de sondeos mixtos y pozos a cielo abierto; de ellos se extrajeron muestras de suelo alteradas e inalteradas y se determinaron sus propiedades índice y mecánicas.

3.1 Exploración geotécnica

Dentro del trazo de la cortina se programaron tres sondeos cuyas coordenadas se presentan en la Figura 1. El sondeo SM-1 se ubicó al lado norte del predio, el SM-2 al lado poniente y el SM-3 al lado suroeste. En estos

sitios explorados, los sondeos se ejecutaron aplicando la técnica de Penetración Estándar (SPT), con objeto de determinar el número de golpes necesarios para lograr la penetración de la herramienta en el terreno y estimar, de manera indirecta, la resistencia del suelo, además de extraer muestras representativas que permitieran obtener sus propiedades índice, su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), además de determinar sus propiedades mecánicas, en caso de ser posible la obtención de muestras inalteradas.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los trabajos ejecutados en campo, se observó que el sitio donde se realizó el sondeo SM-1, que se perforó hasta 30.10 m de profundidad, se encontraron principalmente limos arenosos empacados en gravas, con una caverna de aproximadamente 1 m, a 19 m de profundidad.

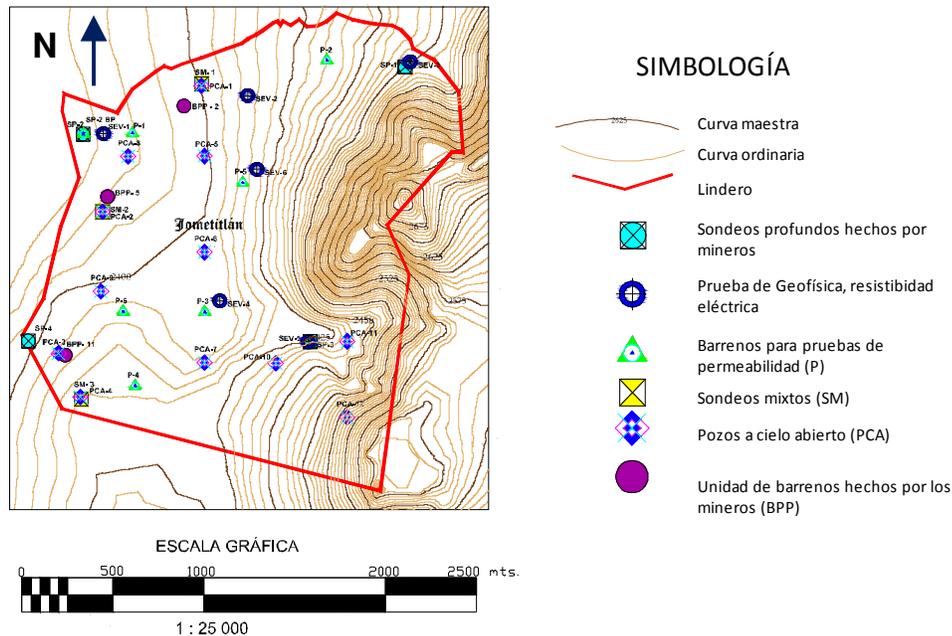


Figura 1. Ubicación de sondeos o pruebas para determinar propiedades mecánicas o hidráulicas.

En el sondeo SM-2, realizado hasta 50.34 m, se encontraron intercalaciones de arcilla, limo, grava con limo y arena hasta 21 m y el resto se compone por tobas con basalto fracturado. Finalmente, en el sondeo SM-3 que se perforó hasta 30 m, en los primeros 6 m de profundidad se encontraron intercalados arcilla, basalto y grava con limo y el resto del sondeo toba y granito fracturado.

Es de llamar la atención que en los sondeos SM-1 y SM-2 se encontró una caverna u oquedad entre 19 y 20 m de profundidad; sin embargo, dada la naturaleza de las rocas en que se detectaron, indica que se trata de oquedades aisladas.

En el sondeo SM-1 se observan en los primeros 3 m valores crecientes en el número de golpes con la

profundidad, de 5 a 25; posteriormente, se detecta un material muy rígido entre 3 y 6 m, con número de golpes superior a 40. De 6 a 15 m se mantiene el número de golpes cercano a 30 y, por debajo de esta profundidad, el suelo se mantiene con números de golpes ubicados entre 30 y 40, que se asocian con un material rígido.

En el sondeo SM-2, exceptuando los primeros 2 m en los que el número de golpes está entre 5 y 15 golpes, hasta 20 m se detecta un material muy rígido, con más de 40 golpes y, de 20 m en adelante se tiene roca fracturada.

En el SM-3 la roca se encontró a 6 m de profundidad y en este intervalo el suelo muestra un número de golpes que varía entre 15 y 40, con rigideces medianas a altas.

3.2 Resultados de laboratorio

De los sondeos mixtos 1 a 3, para cada muestra recuperada de los sondeos realizados (Tabla 1), se determinaron las siguientes propiedades índice de los suelos:

- Límites líquido y plástico, w_L y w_P .
- Densidad relativa de sólidos, G_s .
- Granulometría por separación de tamaños en tamices.
- Clasificación SUCS.

A lo largo de los sondeos los suelos finos tienen el contenido de agua entre 20 y 30%, el límite líquido (w_L)

entre 35 y 40%, límite plástico entre 18 y 37% y el contenido de finos entre 50 y 90%, lo que indica que todo el espesor de suelo lo componen arcillas arenosas de muy baja plasticidad (Tabla 1). Respecto a los materiales gruesos, los porcentajes de finos, arenas y gravas son variados, en intervalos que van de 12 a 45% los finos, 5 a 49% las arenas y 9 a 61% las gravas.

De los PCA-1 y PCA-4, tanto del material alterado como de las muestras cúbicas, se determinó la densidad relativa de sólidos, G_s , y se obtuvieron valores de 2.464 y 2.482, respectivamente. Estos valores son muy comunes en limos o limos arenosos.

Tabla 1. Propiedades índice y clasificación SUCS en muestras obtenidas de PCA.

Descripción del pozo	Grava G %	Arena S %	Finos F %	Límite líquido w_L %	Límite plástico w_P %	Índice de plasticidad PI %	Clasificación SUCS
PCA 1	4.2	31.9	63.9	28.4	19.9	8.5	CL- Arcilla arenosa de baja plasticidad
PCA 2	3.8	19.2	77	37.6	22	15.6	CL- Arcilla arenosa de baja plasticidad
PCA 4	0	43.7	56.3				
PCA 5	2	25.3	72.7	30.2	17.8	12.4	CL- Arcilla arenosa de baja plasticidad
PCA 6	3.5	55.3	41.2				
PCA 8	0	21.3	78.7	38.5	26	12.5	CL- Arcilla arenosa de baja plasticidad
PCA 9	0	60.4	39.6				
PCA 10	73.2	15.5	11.3	49	37.1	11.9	GW-GC Grava bien graduada con limo y arena
PCA 11	57.4	19.3	23.3				

En la tabla 3 se muestran los resultados de laboratorio correspondientes.

De cada uno de los PCA, tanto de los que están sobre el eje de la cortina como de los que se encuentran en el área del vaso de la presa, se determinaron las propiedades índice de los suelos. Se encontró que, en general, se clasifican como arcilla de muy baja plasticidad, o arenas o gravas limosas (Tabla 1). En los casos en los que se extrajeron muestras cúbicas, el material estaba cementado por los finos, lo cual permitió labrar probetas y ejecutar ensayos de resistencia al cortante.

Los ensayos triaxiales que se ejecutaron fueron de tipo no consolidado no drenado (UU), a tres niveles de esfuerzo de confinamiento, 0.5, 1 y 1.5 kg/cm². Se ensayaron siete series; de ellas, dos fueron en probetas inalteradas correspondientes a PCAs ubicados en el eje de la cortina. Los resultados de estas dos series muestran ángulos de fricción entre 25.4 y 28.6°, y una cohesión entre 0.12 y 0.195 kg/cm² (Tabla 2). Tanto el ángulo de fricción como la cohesión tienen valores nominales muy razonables para el basamento sobre el que se desplantará la cortina, y si se considera que, de acuerdo a los sondeos mixtos, los primeros 5 m son los menos rígidos, se espera que debajo de esta profundidad, estos parámetros mecánicos corresponden a suelos más competentes, presentando una cohesión y ángulo de fricción mayor.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de resistencia al esfuerzo cortante

Descripción del pozo	Angulo de fricción ϕ grados	Cohesión c kg/cm ²	Observaciones
PCA- 1- MC 1	25.438	0.195	Material inalterado
PCA- 4- MC 1	28.641	0.120	

3.3 Propiedades índice de los jales.

Se determinaron las propiedades índice de los jales integrales. De los resultados obtenidos se clasificó, según el SUCS (ASTM D 2487), como ML-Limo arenoso de baja plasticidad, con 66.9% de finos y 33.1% de arenas (ASTM D 422-63), con límites líquido, w_L , y plástico, w_P (ASTM D 4318-00), de 31.2 y 25.0%, respectivamente, lo que representa un índice de plasticidad (PI) de 6.2%, y una densidad relativa de sólidos, G_s (ASTM D 854-02), de 2.725.

3.3.1 Propiedades mecánicas de los jales

Para formar las probetas se utilizó un método de compactación estática, el cual consiste en homogeneizar el material integral con contenidos de agua (w) que varían entre 5 y 12%, y formar la probeta en 10 capas de igual cantidad de material, aplicando 12 pisonadas por capa, con un pisón de diámetro un poco mayor al radio de la probeta y una secuencia como la que se muestra en la Figura 2. Se utilizaron pesos de pisón (P_p) que variaron entre 150 y 1040 g, con lo cual se logran relaciones de vacíos (e) en condiciones medianamente

sueltas a densas (Flores, 2008). Los resultados se muestran en la Figura 3.

Como ilustración, también se indica la compacidad, C (Orozco, 1978), definida como la concentración de sólidos o relación entre el volumen de sólidos y el volumen total de la masa de suelo, $C = [1/(1+e)]$.

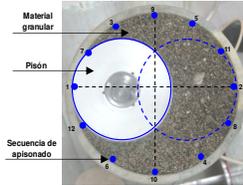


Figura 2. Secuencia de apisonado para formar probetas (Flores, 2008).

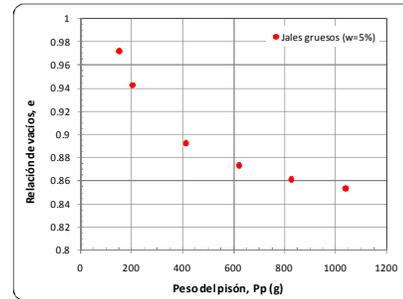
Con el método definido en el inciso anterior se formaron tres series de ensayos de tres muestras cada una, sometidas a diferentes niveles de esfuerzo efectivo. La primera serie se ensayó en condiciones parcialmente saturadas (prueba tipo UU) y las otras dos en condiciones saturadas (prueba tipo CU), con medición de presión de poro.

Para las probetas ensayadas en condiciones saturadas (Figura 4), se obtuvieron, para la muestra más suelta ($e \approx 0.94$), ángulos de fricción en condiciones de esfuerzos totales y efectivos de 12.54 y 17.87°, y cohesiones de 0.227 y 0.186 kg/cm², respectivamente. Para la muestra más densa ($e \approx 0.86$), ángulos de fricción en condiciones de esfuerzos totales y efectivos de 14.05 y 20.33°, y cohesiones de 0.105 y 0.186 kg/cm², respectivamente.

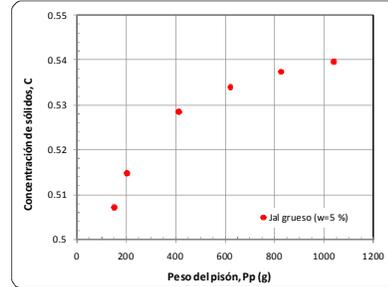
En la serie que se ensayó en la condición parcialmente saturada, se obtuvo un ángulo de fricción de 20.67° y una cohesión de 0.13 kg/cm² (Figura 5). Esta condición correspondería al material ya consolidado por el efecto de la sobrelevación, cuando haya perdido humedad y se encuentre parcialmente saturado.

4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Para analizar la estabilidad de la cortina se utilizó un procedimiento de equilibrio límite por dovelas, con la metodología de cálculos de Morgenstern-Price, el cual permite discretizar la masa de suelo potencialmente deslizable en pequeñas franjas verticales que son analizadas de forma individual. Con este método se facilita el análisis de geometrías complejas, variedad en los tipos de suelo y la aplicación de cargas externas (Abramson et al., 2001).

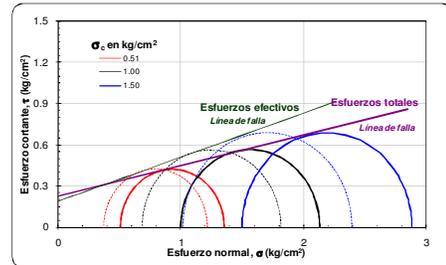


a) Relación de vacíos

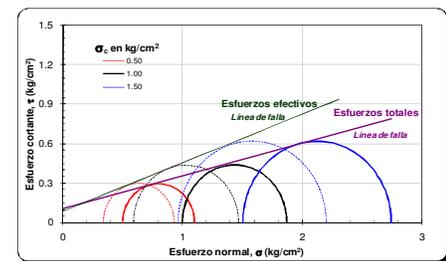


b) Concentración de sólidos

Figura 3. Intervalo de la relación de vacíos y concentración de sólidos posibles de reproducir en laboratorio.



a) $e \approx 0.86$



b) $e \approx 0.94$

Figura 4. Círculos de Mohr, ensayo tipo CU.

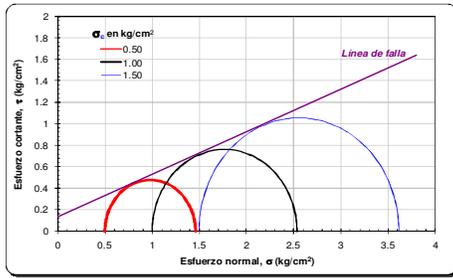


Figura 5. Círculos de Mohr, ensaye tipo UU ($e \approx 0.86$).

4.1 Modelos geotécnicos

Se consideraron cuatro opciones constructivas, considerando sólo el uso de enrocamiento en la construcción de la cortina o enrocamiento y jales, tal como se describen enseguida:

4.1.1 Opción 1: Construcción de la cortina con el método con enrocamiento

Se desplanta con el bordo iniciador que se ubica al pie de la presa "aguas arriba" y va creciendo, de manera uniforme, con taludes de pendiente constante en ambas caras de la cortina, tal como se ilustra en la Figura 6.

La cortina se construirá, básicamente, con los siguientes tres materiales:

Enrocamiento de diferentes graduaciones divididas en tamaño granulométrico chico, mediano y grande. El enrocamiento chico corresponde a fragmentos de roca triturada de tamaños que van de 4 a 8 pulgadas, en ocasiones en combinación con gravas gruesas y arena; el mediano va de 8 a 12 pulgadas y el grande de 12 hasta 20 pulgadas.

- Filtro. Está compuesto por materiales con clasificación SW-SM - arena limosa bien graduada compactada. Dependiendo de lo que se encuentre en sitio, con contenidos de materiales cercanos a: 60 a 70% de arena y 30 a 40% de limo o arcilla de baja plasticidad.

- Jales. Los jales retenidos en la malla 200 (jales gruesos) se colocarán en el talud de la cara "aguas arriba" de la cortina, con el objeto de obtener una aportación adicional a la estabilidad estructural de la presa.

Bajo la distribución granulométrica anterior se cumplirá con la ley de permeabilidades que marca la NOM-141-SEMARNAT-2003, donde se recomienda que los materiales colocados vayan, del vaso al talud de "aguas abajo", de menor a mayor permeabilidad.

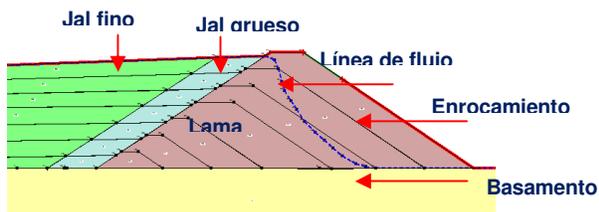


Figura 6 Modelo geotécnico para el método con enrocamiento

4.1.2 Opción 2: Construcción de la cortina con el método "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento.

Consiste en construir parte de la cortina de enrocamiento usando el método "aguas abajo" y posteriormente de jales gruesos usando el método "aguas arriba", tal como se ilustra en la Figura 7. Se desplanta con el bordo iniciador que se ubica al pie de la cortina "aguas arriba" y va creciendo de manera uniforme con taludes de pendiente constante en ambas caras de la misma.

La cortina se construirá, básicamente, con los siguientes tres materiales:

- Enrocamiento. Mismas especificaciones que en la opción 1.

- Filtro. Mismas especificaciones que en la opción 1.

- Jales gruesos. De los resultados obtenidos se clasificó, según el SUCS, como ML-Limo arenoso de baja plasticidad, con 66.9% de finos y 33.1% de arenas y una densidad relativa de sólidos, $G_s = 2.725$.

Para el análisis de estabilidad se utilizaron los modelos geotécnicos mostrados en las Figuras 7-9. Para la parte superior de la cortina, los dos primeros (Figs 7-8) consideran la colocación del enrocamiento en la cara "aguas abajo", sólo que el enrocamiento que arroja los jales como contribución a la estabilidad y protección contra la erosión, en un caso no se presenta traslape (método "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento, Figura 7) y en el otro sí (método "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento con traslape, Figura 8). El tercer modelo (Fig. 9) consiste en mantener la cara "aguas abajo" con jales gruesos (método "aguas arriba" y "aguas abajo").

Considerando que se cumplen las condiciones de compactación descritas en los párrafos anteriores, se propone para los tres modelos planteados que el talud de la cortina sea 1.5:1 (horizontal : vertical), con una corona de 10 m de ancho en el caso del modelo de enrocamiento y "aguas abajo" y "aguas arriba", 15 m para "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento (con traslape) y 20 m para "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento.

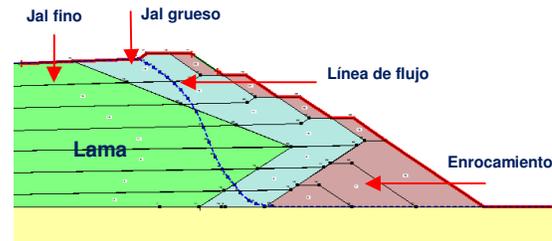


Figura 7 Modelo de análisis para el método "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento



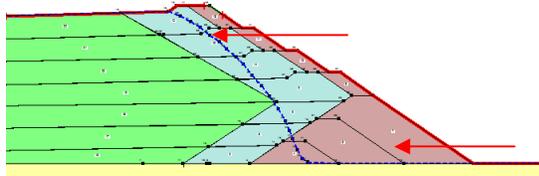


Figura 8 Modelo de análisis para el método "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento (con traslape)



Figura 9 Modelo de análisis para el método "aguas abajo" y "aguas arriba".

4.2 Cálculo de volúmenes de almacenamiento

Se estableció que el volumen a almacenar en la presa será de 70.5 millones de metros cúbicos de material de jal. Bajo las consideraciones expuestas, se propuso el trazo mostrado en la Figura 10 y, a partir de éste, se definió que la altura de la cortina que se requiere para el almacenamiento del volumen solicitado y considerando que se requiere un bordo libre de 2 m, será de 63 m en la sección más alta.

Con base en el trazo propuesto de la cortina de la presa y considerando la topografía actual del terreno, la capacidad aproximada de almacenamiento de los jales con la altura de la cortina es la que se muestra en la Figura 11a. En la Figura 11b se presenta el área de influencia del espejo de jal en función de la altura de la cortina.

Al considerar una altura de la cortina de 63 m, el volumen de enrocamiento que se requiere es de 14.4 millones de m^3 . En caso de que se construya la cortina con enrocamiento hasta 30 m, el volumen requerido es de 7.4 millones de m^3 , más 4 millones de m^3 para el arroje, lo cual hace un total de 11.4 millones de m^3 .

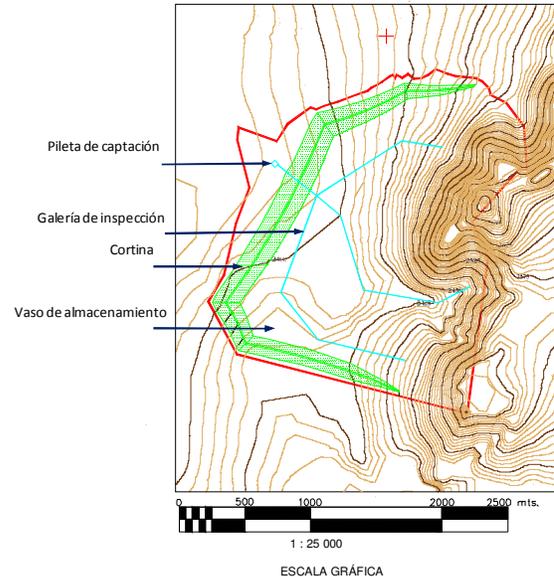


Figura 10. Esquema del trazo de la cortina contenedora (elevación en m).

4.3 Análisis de estabilidad de la cortina bajo condiciones estáticas y accidentales por sismo.

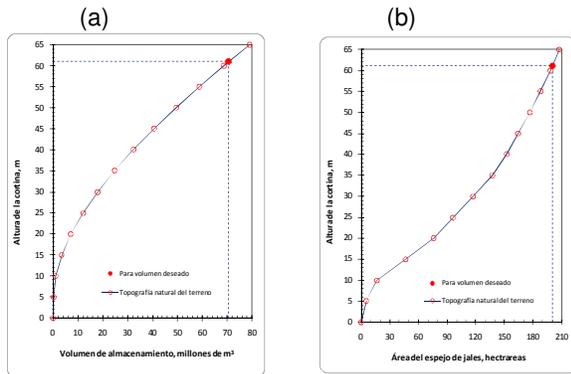
De acuerdo con las características granulométricas de los materiales que contribuyen a la estabilidad del talud, y a los resultados de laboratorio de los materiales del basamento y los jales, se emplearon los parámetros mecánicos que se muestran en la tabla 3 para realizar los análisis de estabilidad (Marsal y Reséndiz, 1975, Flores et al., 2002). Se destaca que los parámetros mecánicos considerados para los materiales del basamento de la cortina, corresponden a los ubicados después del retiro de la capa de materiales superficiales, siendo de mayor competencia que los detectados superficialmente en los PCA.

Con estos parámetros mecánicos y la geometría de la cortina, se hicieron los análisis para las condiciones de estabilidad estática y accidental por sismo, a cada 10 m de crecimiento de la cortina, hasta llegar a 70 m de altura (Figura 12). Se encontró, para la altura de 60 m (para la cual también se hizo el análisis), que el que tiene mejor comportamiento es la cortina construida con enrocamiento, con factores de seguridad para la altura máxima de 1.689 para la condición estática y 1.321 para la condición accidental por sismo.

Para el método "aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento, los factores que se obtuvieron fueron 1.619 para la condición estática y 1.162 para la condición accidental por sismo. En el caso de que el enrocamiento se encuentre traslapado (aguas abajo" y "aguas arriba" con enrocamiento con traslape), los factores de seguridad para $H=60$ m resultaron de 1.458 para condición estática y 1.119 para sismo.

Para el método "aguas abajo" y "aguas arriba" los factores de seguridad máximos fueron 1.387 para condiciones estáticas y 0.936 para la condición

accidental por sismo. En este caso es claro que, para la condición sísmica se ubica abajo de la unidad para $H=60$ m, prácticamente en condición de falla. Estos valores nos permiten concluir, respecto a este método constructivo, que es inadmisibles sobrelevar la cortina a la altura que demanda el volumen de almacenamiento requerido de jales.



a) Volumen de almacenamiento
b) Área del espejo de jales

Figura 11. Variación de los volúmenes de almacenamiento y área del espejo.

Tabla 3 Parámetros mecánicos propuestos para el análisis de estabilidad de la cortina

Parámetro	Unidades	Zona de la presa			
		Cortina	Jales finos	Jales gruesos	Basamento
Ángulo	grados	45	12	18	35
Cohesión	t/m^2	3	2	2.5	3
Peso Vol.	t/m^3	2	1.6	1.8	1.8

Aún cuando en la normatividad mexicana no están explícitamente indicados los factores de seguridad con que debe cumplir la estabilidad de una cortina para presa de jales, se considera admisible obtener factores de seguridad mínimos de 1.3 y 1.5 bajo condiciones estáticas de corto y largo plazo, respectivamente, así como un factor de seguridad de 1.1 bajo condición de carga accidental por sismo.

Bajo el criterio establecido y los resultados obtenidos, es claro que el método más conveniente para la construcción de la cortina es el método de enrocamiento. Sin embargo, es admisible emplear también los métodos constructivos de “aguas abajo” y “aguas arriba” con enrocamiento (con o sin traslape), teniendo conciencia plena de que una sobre-elevación adicional a la altura máxima especificada, pone en riesgo la estabilidad de la presa por una falla en la cortina.

5 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

5.1 Cortina de enrocamiento

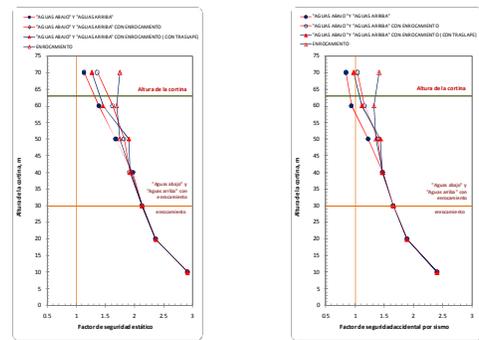
– Es necesario hacer un perfecto despalme del terreno para garantizar que la base de la cortina se desplante sobre terreno firme.

– El enrocamiento se colocará a volteo en capas no mayores a 50 cm y deberá ser bandeado o extendido con trascabo. Ya extendido y, en el caso de que el suelo esté seco, se deberá regar agua en la superficie con objeto de alcanzar una humedad cercana a la óptima de la prueba Proctor estándar, en los materiales en que este parámetro se pueda verificar; posteriormente, se deberá compactar haciendo uso de un equipo con rodillo “pata de cabra”, el número de veces que sea necesario para alcanzar una compactación equivalente a 95% de la prueba Proctor estándar.

– En la cara aguas arriba se colocará el filtro con un ancho no menor a 40 cm, posteriormente el enrocamiento de tamaño chico (tipo 1) con un ancho de 14 a 15 m, en seguida el tamaño mediano (tipo 2) con un ancho de 50 m y, finalmente, el enrocamiento grueso (tipo 3), hasta llegar a la cara “aguas abajo”. En la figura 13a se muestra esquemáticamente la distribución de los materiales.

– Una vez construido el bordo iniciador, con una altura mínima de 5 m, se inicia el vaciado de los jales. Los jales gruesos deben quedar en contacto con el filtro, cara “aguas arriba”, manteniendo de manera estricta un bordo libre mínimo de 2 m.

Bajo la distribución granulométrica anterior se cumple con la ley de permeabilidades que marca la NOM-141-SEMARNAT-2003, donde se recomienda que los materiales colocados vayan, del vaso al talud de “aguas abajo”, de menor a mayor permeabilidad.



a) Estática

b) Sísmica

Figura 12. Factor de seguridad en condiciones estáticas y sísmicas

5.2 Cortina “Aguas abajo” y “Aguas arriba” con enrocamiento

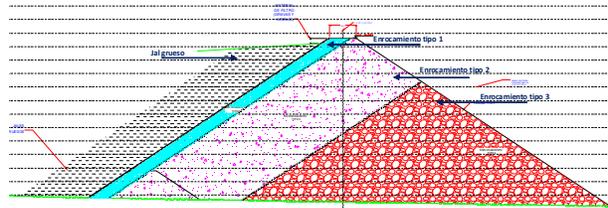
Se aplica el mismo procedimiento descrito en el punto 5.1 hasta 30 m de altura y, posteriormente continúa de la forma siguiente:

– Después los 30 m de altura del bordo construido con enrocamiento se continúa con jales hacia “aguas arriba”, partiendo de la esquina del lado “aguas arriba” de la corona, tal como se ilustra en la Figura 13b. Es

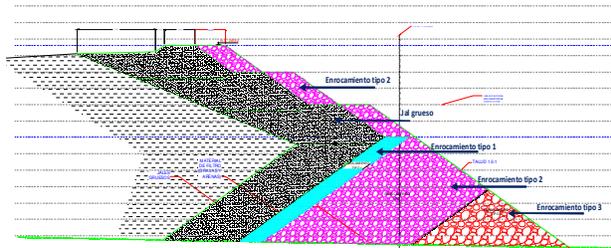
necesario ir construyendo el bordo con los jales gruesos por medio de cicloneo, dejando una playa lo más amplia posible y un bordo libre no menor a 2 m. Cuando se llegue a los 10 m de altura del bordo con jales se construirá una terraza.

- Una vez iniciada la formación del siguiente bordo, se protegerá la cara “aguas abajo” de la cortina correspondiente al bordo anterior, con enrocamiento chico y mediano colocado a volteo.

- Cuando se alcance la altura máxima, se debe garantizar que se respete el bordo libre y se proteja la cara “aguas abajo” de la cortina.



a) Cortina de enrocamiento



b) Cortina “aguas abajo” y “aguas arriba” con enrocamiento

Figura 13. Materiales que componen la cortina

6 PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN

Con objeto de dar seguimiento al comportamiento de la cortina proyectada durante su construcción y servicio, es conveniente instalar un sistema de monitoreo que permita detectar cualquier comportamiento anómalo de la estructura. Con ello será posible prever cualquier situación que afecte la operación de la presa o, en su caso, identificar signos asociados a una posible inestabilidad de la estructura. Complementariamente, la instrumentación permitirá también verificar las hipótesis planteadas en el diseño y, de ser necesario, se realizarán ajustes al proyecto original.

Particularmente interesa conocer el comportamiento de la cortina y cuantificar las condiciones hidrodinámicas que se presentan en su estructura.

Para el monitoreo de la estructura se propone la colocación de los siguientes elementos de instrumentación:

- Referencias superficiales.
- Piezómetros.
- Inclinómetros.

En la Figura 14 se muestran los cadenamamientos a los que se considera pertinente colocar instrumentación y en la Figura 15 la distribución en corte. En total son nueve ejes de medición que coinciden con la parte central de cada uno de los arcos y los puntos de cruce de éstos, excepto en el tramo más largo donde se proponen dos ejes de medición en un solo arco.

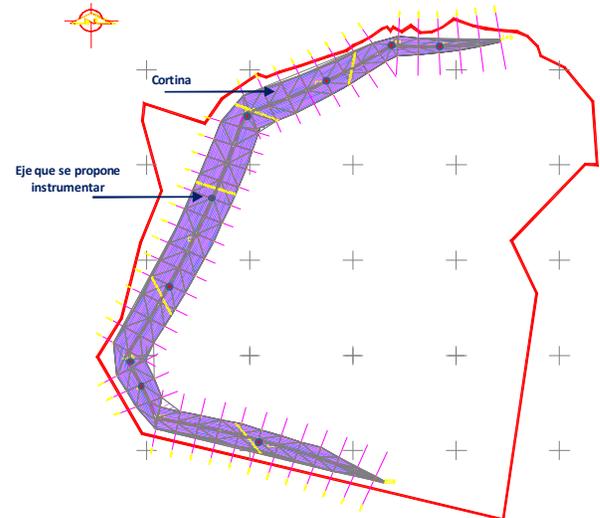


Figura 14. Esquema de los puntos de cruce de los ejes de medición propuestos

Es recomendable para la instalación de las referencias superficiales, la realización de una excavación superficial donde quede alojado un muerto de concreto de 20 cm de diámetro y 40 cm de longitud, con una punta metálica de 100 cm de longitud (varilla) en la que se indique con bajo relieve (“corte en cruz”) el punto preciso de medición. Este elemento se protegerá con un registro de tapa metálica (figura 15a).

Las lecturas en los puntos de referencia se realizarán mediante levantamientos topográficos de precisión, con mediciones en tres direcciones ortogonales (X, Y y Z). Para ello, se tomará como referencia un banco fijo alejado del sitio, totalmente ajeno a los movimientos que la cortina en su conjunto pueda desarrollar. Las coordenadas X, Y podrán ser tomadas mediante estación total con precisión mínima de 0.5 cm, en tanto que la obtención de niveles (Z) deberá ser realizada con nivel fijo.

Los piezómetros propuestos para el monitoreo de la presión de poro serán de celdas abiertas, tipo Casagrande. Se propuso que los piezómetros se instalen en la zona de mayor altura de la cortina y estarán constituidos por celdas ubicadas a diferentes profundidades, en función del proceso constructivo y, consecuentemente, de la elevación de la cortina. La instalación de estos instrumentos se realizaría cuando se construya el cuerpo de la cortina con material de jal, alcanzando 40 m, 50 m y 63 m de altura total de la estructura, asociados a las elevaciones N+2430 m, N+2440 m y N+2453 m, respectivamente (Figura 15b).

Además, es recomendable instalar piezómetros e inclinómetros al pie de la cortina, "aguas abajo". La información que estos instrumentos proporcionen, permitirá disponer de información oportuna sobre el flujo de agua y comportamiento generalizado de la cortina.

Alternativamente, es posible emplear piezómetros electrónicos de cuerda vibrante en sustitución, o

complementariamente, a los de celdas abiertas. Por sus características, los piezómetros de cuerda vibrante son de fácil colocación y monitoreo durante el proceso constructivo (Figura 15).

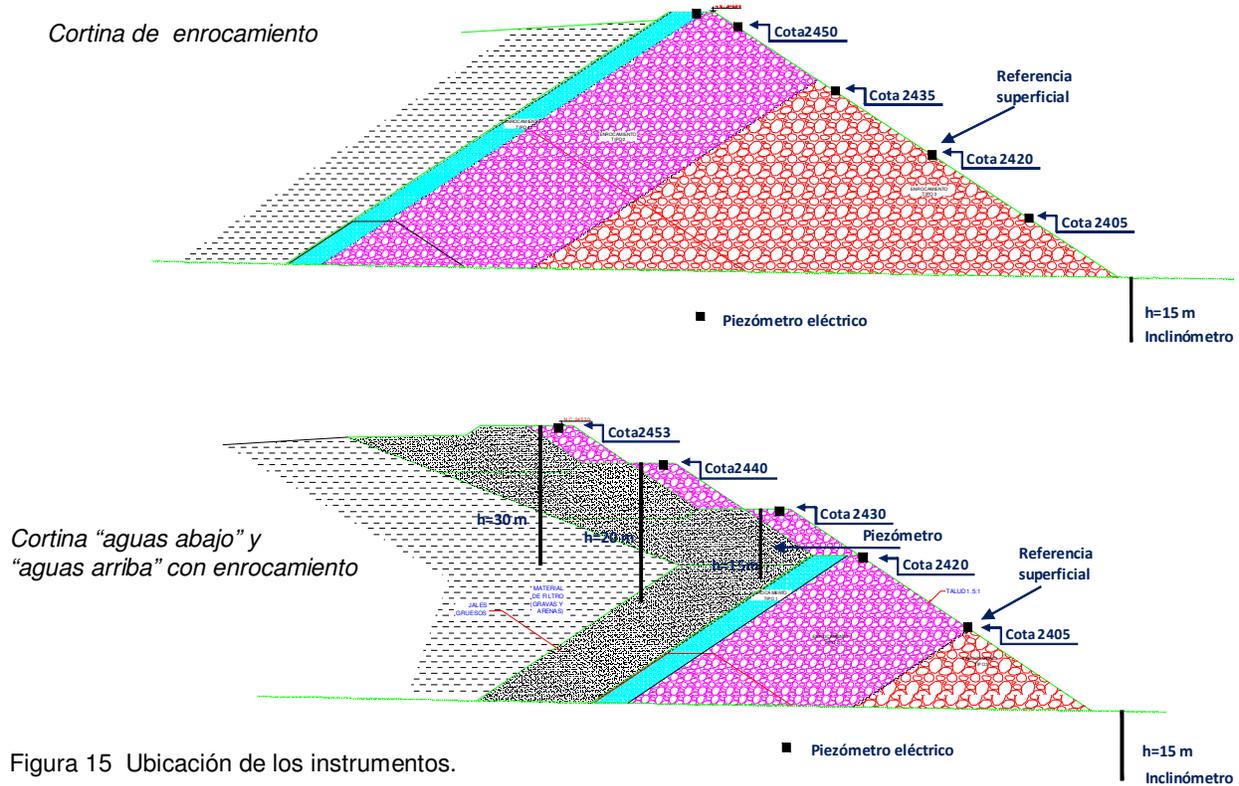


Figura 15 Ubicación de los instrumentos.

7 COMENTARIOS RESPECTO AL CIERRE DE LA PRESA

Para el diseño del cierre de la presa, cuando ésta haya llegado a su capacidad máxima, se enlistan los que se consideran más importantes:

- Se debe respetar un bordo libre (BL) mínimo de 2 m del nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME).
- Debe proyectarse del vertedor de excedencias de acuerdo a la máxima avenida probable y la topografía en el jal del área del vaso tal que de forma natural desaloje el agua hacia el vertedor.
- El jal se debe arropar con material terreo grueso para evitar la erosión eólica y pluvial.
- Debe plantarse vegetación nativa de la zona para forestar el área cubierta por los jales.

8 CONCLUSIONES

Primera. La cortina que se proyectó con apoyo en la normatividad (NOM-141-SEMARNAT-2003) servirá para almacenar 70.2 millones de m³ de jales, tendrá una altura de 63 m en su sección máxima y una longitud de 2.85 km. El área inundada, para la condición de mayor altura, será de 203 hectáreas.

Segunda. Con las pruebas de campo y laboratorio que se ejecutaron fue posible caracterizar el basamento sobre el que se desplantará la cortina y los jales gruesos que aportarán, en términos de resistencia, a la estabilidad.

Tercera. De los modelos estudiados, los que arrojaron factores de seguridad en condiciones estáticas y accidentales por sismo favorables, fueron los correspondientes al enrocamiento, usando el método constructivo "aguas abajo", en primer término y, como segundo, los primeros 30 m con enrocamiento y el resto con los jales gruesos usando el método "aguas arriba" y arropando estos jales con enrocamiento.

9 RECOMENDACIONES

Primera. Se propone una instrumentación básica para monitorear los movimientos en la cortina y en la condición hidrodinámica, tanto en la cortina como en el basamento. Con esta instrumentación, los ingenieros encargados de la operación de la obra tendrán elementos cuantitativos para calificar el desempeño de la estructura y en su caso, para tomar medidas preventivas, si es necesario.

Segunda. En este tipo de obras en las que se utiliza el mismo material que se almacena como elemento constructivo, y debido a que éste suele tener parámetros mecánicos relativamente bajos, se hace necesario hacer una detallada caracterización de los elementos que conforman la cortina, respetar el procedimiento constructivo que se proponga y llevar un control de calidad de los materiales, respetando lo siguiente: instrumentar la estructura, tanto en el interior, en la cara “aguas abajo”, como en el basamento y llevar un estricto procedimiento de toma de lecturas y un detallado análisis de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los ingenieros Mario A. Toledo C. y Héctor Brianza por el apoyo brindado en la ejecución de los trabajos de campo y gabinete.

REFERENCIAS

- Abramson L, Lee T, Sharma S and Boyce G (2001) *Slope Stability and Stabilization Methods*, Tomo II, John Wiley and Sons, Inc.
- ASTM D-422-63 (1998) *Standard test method for particle size analysis of soils.*
- ASTM D-854-02 (1998), *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.*
- ASTM D-4318-00 (1998), *Standard test methods liquid limit, plastic limit, and plastic index of soils.*
- ASTM D-2487-00 (1998), *Standard practice for classification of soils of Engineering purposes (Unified soil classification system).*
- Bowles, J (1984), *Foundation Análisis and Design*, McGraw-Hill.
- Flores, O. (2008), *Módulo de rigidez y relación de Poisson dinámicos obtenidos de mediciones en la franja del tercio medio en probetas de suelo granular*, Tesis de doctorado, DEFI-UNAM, enero.
- Flores, O., Romo, M. P., Castellanos, E., y Orozco, R. V. (2002), *Comportamiento estático y dinámico de residuos mineros con 10 y 48 % de finos*, Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, Qro.
- INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Información Geográfica. *Aspectos del Territorio Estatal*. Página de Internet: www.inegi.org.mx
- Juárez E. y Rico A. (1989), *Mecánica de Suelos*, Tomo II. Editorial Limusa, México.
- Krahn John (2004), *Stability Modeling with SLOPE/W An Engineering Methodology*, GEO SLOPE/W International, Ltd. Calgary, Alberta, Canada.
- Marsal, R., y Reséndiz, D. (1975), *Presas de tierra y enrocamiento*, Editorial Limusa, primera edición.
- MOC (1993), *Manual de Obras Civiles. Diseño por Sismo*. Comisión Federal de Electricidad.
- NOM-141-SEMARNAT-2003 (2004), *Norma oficial Mexicana que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y*

critérios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales, Diario Oficial de la Federación, septiembre.

- Orozco R. V., Quiñónez H. y Allende L. (1975), *Manual para la aplicación de las cartas edafológicas de CETENAL para fines de Ingeniería Civil*, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, México.
- Zeevaert L. (1983), *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*, Van Nostrand Reinhold, New York.