

ASENTAMIENTOS PERMANENTES POR SISMO EN PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO

Fernando Hernández Prieto, SEPI ESIA-UZ (Geotecnia), fernandezp0904@ipn.mx

RESUMEN

Una presa es una obra hidráulica constituida por una barrera o cortina fabricada con distintos materiales y otras obras hidráulicas complementarias como la obra de toma, el vertedor, el canal de desvío, etc. Que se construye habitualmente en el cauce de un río, con la finalidad de almacenar el agua para su posterior aprovechamiento.

El procedimiento general de análisis de una presa de tierra y enrocamiento sometida a un evento sísmico incluye los siguientes pasos (Seed et al., 1975):

- a) Se determina la sección de la presa y el sismo de diseño.
- b) Se calcula la distribución inicial de esfuerzos en el terraplén antes de que ocurra el temblor.
- c) Seleccionar las propiedades dinámicas no lineales de los materiales constitutivos.
- d) Se calculan los esfuerzos dinámicos inducidos en el terraplén por el sismo de diseño
- e) Se determinan los efectos que puedan tener los esfuerzos dinámicos sobre cada elemento
- f) Se evalúa el factor de seguridad del terraplén durante o después de la acción del sismo
- g) Si el terraplén es estable, se calculan las deformaciones permanentes.

Una **deformación permanente sísmica**, es la acumulación de deformaciones y desplazamientos plásticos generados por efectos de inercia de las fuerzas sísmicas y la compactación dinámica del material. Para ello se propone describir e implementar un método para estimar los asentamientos permanentes por sismo en PTE a partir de modelos numéricos bidimensionales que consideren los aspectos más importantes del fenómeno analizado.

Durante una carga cíclica no uniforme, como la que ocurre durante un sismo, se presentan deformaciones volumétricas permanentes. Con este fin, se realizan análisis de elementos y diferencias finitas donde se modelan los distintos tipos de cortinas con un modelo que permite el cálculo de los cambios de volumen de los materiales. Los modelos de este tipo (Martin, Finn y Seed, 1974; Stanatopoulos, Bouckovalas y Whitman, 1991) permiten establecer una correlación semi-empírica entre la deformación angular y los consiguientes cambios volumétricos, En este estudio, la correlación propuesta por Martin, Finn y Seed (1974) se utiliza:

$$\Delta\varepsilon_v = c_1(\gamma - c_2\varepsilon_v) + \frac{c_3\varepsilon_v^2}{\gamma + c_4\varepsilon_v} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $\Delta\varepsilon_v$, es el cambio en la deformación volumétrica (en %), γ es el equivalente de la amplitud de la deformación angular (en %), ε_v es la deformación volumétrica acumulada, (en %), y las constantes c_1 , c_2 , c_3 , y c_4 son parámetros de ajuste del modelo, que dependen de la compacidad relativa y las características del grano. Para obtener estas deformaciones y calcular la pérdida de bordo libre, se proponen realizar modelos numéricos utilizando el método de diferencias finitas con la ayuda del programa FLAC 3D, el cual ya tiene integrado el modelo de Finn para el calculo de deformaciones permanentes.

Palabras clave: **deformación permanente, bordo libre.**

Introducción

En los últimos años se ha incrementado significativamente en México la necesidad de construir presas para el almacenamiento, control de avenidas, generación de energía eléctrica, zonas de riego, suministro de agua potable o una combinación de usos.

La mayoría de estas presas están constituidas por materiales graduados y un alto porcentaje de ellas están ubicadas en zonas sísmicas.

En tiempos recientes se ha logrado un progreso notable en el entendimiento del comportamiento de las presas de tierra y enrocamiento sometidas a la acción sísmica. Se tienen disponibles métodos analíticos y numéricos para calcular la respuesta dinámica de estructuras de tierra y enrocamiento, se realizan ensayos estáticos y dinámicos para determinar las propiedades del suelo bajo cargas estáticas y dinámicas y se disponen de métodos de diseño para evaluar la estabilidad sísmica y el potencial de deformación de éstas.

Debido a la complejidad del sistema de estudio, al formular los modelos matemáticos que permitan analizar su comportamiento ante cargas estáticas y dinámicas, se requieren efectuar hipótesis simplificadoras, en la primera formulación (Monobe et al, 1936), las hipótesis respecto a la geometría y comportamiento, transforman el problema en uno unidimensional equivalente a una viga de cortante de ancho variable linealmente (sección transversal triangular) y el material se considera elástico lineal e isótropo, en trabajos posteriores, se continuó con el mismo modelo sometido a la acción de los sismo, y se obtuvo la solución del modelo matemático mediante series de potencias (Hatanaka, 1955) o con transformadas integrales (Ambraseys, 1960), en los análisis anteriores, debido al modelo que se utilizó, solo se consideran distorsiones del material debidas a esfuerzos cortantes.

El primer modelo utilizado en el análisis bidimensional de presas de tierra y enrocamiento se debe a Ishizaki y Hatakayama (1962), quienes consideran que la presa se puede representar como un estado de deformaciones planas y utilizan el método de diferencias finitas para resolver las ecuaciones de equilibrio dinámico.

En el cálculo de la respuesta sísmica, es necesario considerar el efecto de las vibraciones que cada sismo de magnitud significativa produce en las propiedades in-situ de una presa (en general el aumento el aumento de la rigidez y una disminución en el amortiguamiento); en este mismo sentido se necesita información adicional para determinar el límite de dicho proceso de rigidización o a la relación entre la intensidad de vibración y el grado de rigidez.

Los modelos de elementos y diferencias finitas bidimensionales, no lineales, pueden reproducir los espectros de respuesta dinámica observada en las presas, siempre y cuando los parámetros de las relaciones entre el módulo cortante y la presión confinante, y entre la relación de amortiguamiento y el nivel de deformaciones, se seleccionen adecuadamente

En lo que se refiere al cálculo de las deformaciones inducidas por los sismos, éstas influyen en las propiedades dinámicas con las que se analiza la respuesta de las presas. La pérdida del borde libre calculada con los métodos del bloque deslizante, es de aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que el valor observado, mientras que los resultados **del método simplificado** de deformación son del orden correcto de magnitud

Métodos

En este trabajo el cálculo de pérdidas de bordo libre o asentamientos permanentes por sismo, se realizará utilizando el modelo que a continuación se describe:

Durante las últimas tres décadas, una serie de procedimientos de los diversos grados de sofisticación se han presentado. Estos métodos van desde el simple concepto de deslizamiento del bloque rígido (Newmark, 1965) a métodos más complejos basados en técnicas de elementos y diferencias finitas

Un número importante de presas y bordos de tierra construidos con modernos equipos de compactación que han sido monitoreados durante largos períodos, se ha demostrado que cuando es sacudida por los sismos, estas presas se someten a deformaciones permanentes, debido principalmente a la densificación de los materiales granulares y en menor grado a distorsiones generales del terraplén (Reséndiz, Romo y Moreno, 1982).

Además, estas observaciones continuas de largo plazo parecen descartar el desarrollo de las superficies de falla bien definidas del tipo asumida por el enfoque de deslizamiento de bloques rígidos. Por lo tanto, la hipótesis principal en que se basa este último procedimiento no se verifica por el comportamiento de la presa observado sobre el terreno. En consecuencia, estos métodos deben usarse con mucha cautela cuando se aplica a las presas de enrocamiento (y probablemente, presas de tierra también) con el fin de evaluar los desplazamientos permanentes inducidos por sismos.

Con este fin, se realizan análisis de elementos y diferencias finitas donde se modelan los distintos tipos de cortinas con un modelo que permite el cálculo de los cambios de volumen de los materiales granulares causados por cargas cíclicas. Los modelos de este tipo (Martin, Finn y Seed, 1974; Stanatopoulos, Bouckovalas y Whitman, 1991) permiten establecer una correlación semi-empírica entre la deformación angular y los consiguientes cambios volumétricos, En este trabajo se emplea la correlación propuesta por Martin, Finn y Seed (1974):

$$\Delta \varepsilon_v = c_1(\gamma - c_2 \varepsilon_v) + \frac{c_3 \varepsilon_v^2}{\gamma + c_4 \varepsilon_v} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde $\Delta \varepsilon_v$, es el cambio en la deformación volumétrica (en %), γ es el equivalente de la amplitud de la deformación angular (en %), ε_v es la deformación volumétrica acumulada, (en %), y las constantes c_1 , c_2 , c_3 , y c_4 son parámetros de ajuste del modelo, que dependen de la compacidad relativa y las características del grano.

La mayor parte de la información es válida para arenas. Sin embargo, hay algunos resultados de ensayos triaxiales en gravas gruesas (Hynes, 1989) que proporcionan información valiosa sobre las características de cambio de volumen bajo cargas cíclicas, tal como se muestra en la Fig. 1.

Con esta información y el modelo dado por la ecuación anterior, los valores de los parámetros de ajuste pueden ser estimados.

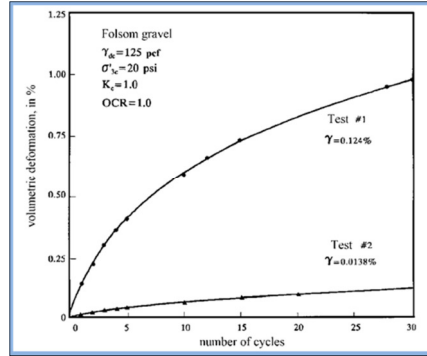


Fig. 1- Deformación volumétrica de gravas por las cargas cíclicas (Hynes, 1989)

Se debe de tomar en cuenta que la ecuación implica el acumulado de la deformación volumétrica permanente " $\Delta\epsilon_{vd}$:" de tal manera que la deformación volumétrica disminuye como la deformación es acumulada.

Presumiblemente, " $\Delta\epsilon_{vd}$:" debe ser cero si (γ) es cero, lo que implica que las constantes se relacionan de la siguiente manera: $C1 * C2 * C4 = C3$.

Para obtener las deformaciones permanentes y calcular la pérdida de borde libre, se realizan modelos numéricos utilizando el método de diferencias finitas con la ayuda del programa FLAC 3D, el cual ya tiene integrado el modelo de Finn para el calculo de deformaciones permanentes.

Resultados

Se comenzó por modelar presas simples de elementos regulares, considerando solo la cortina , y de materiales simplificados.

En la Fig. 2 se muestra una presa homogénea de altura = 120m, taludes aguas arriba y abajo: 1.4:1 (h: v), un ancho de corona: 10m, los elementos usados en el modelado fueron prismas rectangulares o brick elements, con un total de 2100 y el modelo constitutivo empleado fue lineal elástico.

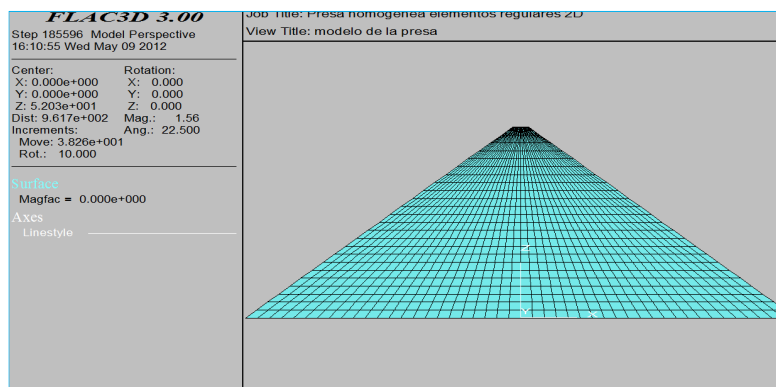


Fig. 2- modelación de presa homogénea

Posteriormente a este modelo numérico que simula la cortina de una presa se le aplicó una excitación en la base , con el objetivo de apreciar los desplazamientos verticales y verificar si éstos representaban el comportamiento real de la misma, tal y como se muestra en el Fig. 3

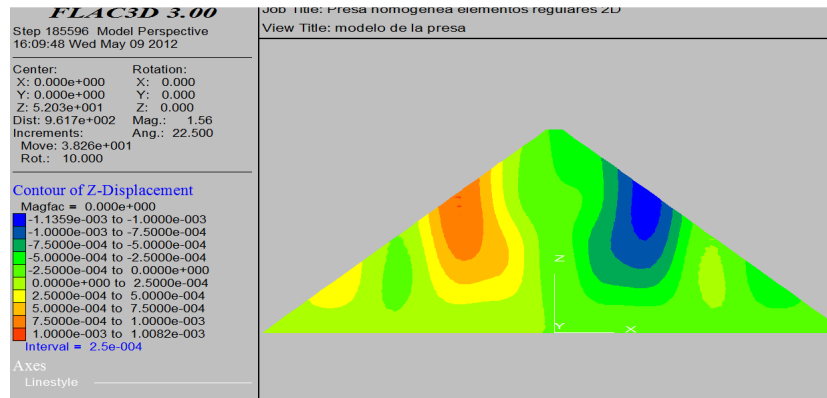


Fig. 3- modelación de presa homogénea

Al evaluar los resultados se notó que se debía agregar un elemento que simulara la cimentación para que la distribución de esfuerzos y los desplazamientos inducidos por el sismo se presentaron en el cuerpo de la cortina, aplicando ahora la excitación en la base de la cimentación.

Los resultados del modelo con una cimentación de roca rígida se presentan a continuación:

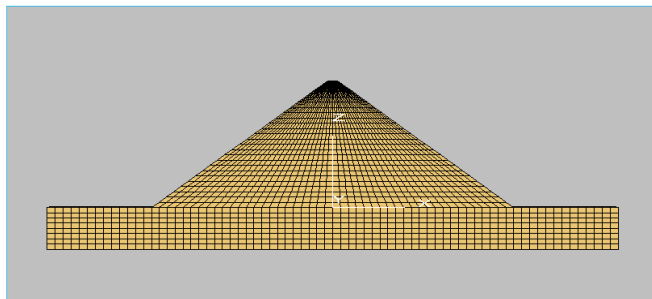


Fig. 4- modelación de presa homogénea

La Fig. 4 presenta la modelación de una presa homogénea de altura = 120m, taludes aguas arriba y abajo: 1.4:1 (h: v), un ancho de corona: 10m y una cimentación de roca rígida. Los elementos usados en el modelado fueron prismas rectangulares o brick elements, con un total de 3600 y el modelo constitutivo empleado fue lineal elástico.

Posteriormente se realizaron una serie etapas de cálculo, para simular los procesos constructivos de la presa, estas etapas consistieron en:

- 1.- Modelado por capas de 5m de altura.
- 2.- Llenado del embalse
- 3.- Aplicación de la excitación

El resultado de estos análisis se muestra en las figuras 5, 6 y 7, todos mostrando los desplazamientos verticales en el eje Z.

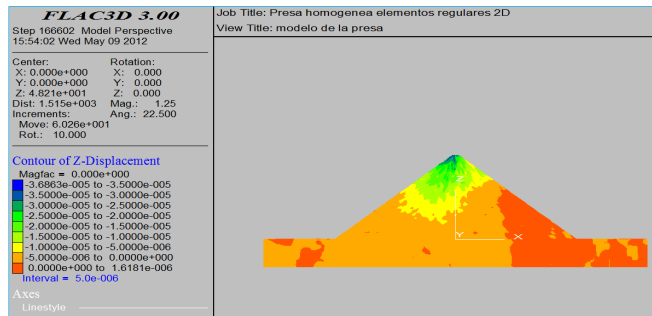


Fig. 5- etapa de aplicación de la excitación, desplazamientos verticales

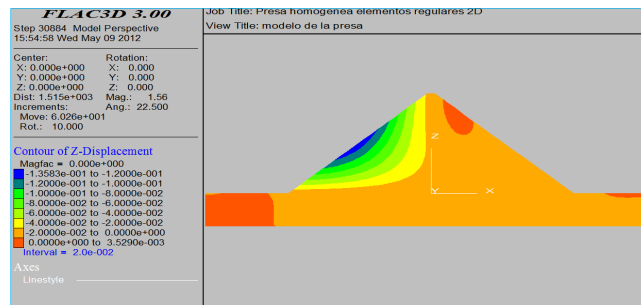


Fig. 6- etapa de llenado del embalse, desplazamientos verticales

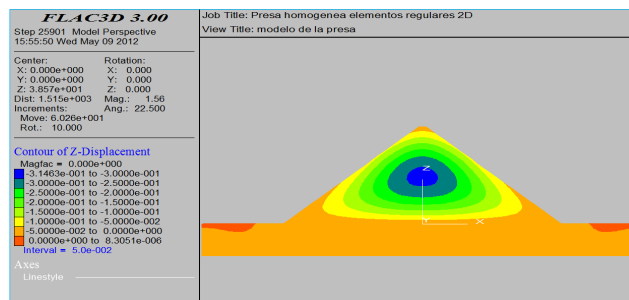


Fig. 7- etapa de construcción por capas de 5m, desplazamientos verticales

Posteriormente se procedió a evaluar el modelo de Finn y Martin, el cual ya esta integrado en el programa FLAC 3D, las propiedades utilizadas en este modelo fueron ajustadas de acuerdo a los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, con el propósito de coincidir con las constantes C1 , C2 , C3 y C4, además se se supuso una línea superior de corriente la cual eventualmente se calcula de manera analítica, el resultado de este modelo se presenta en la Fig. 8.

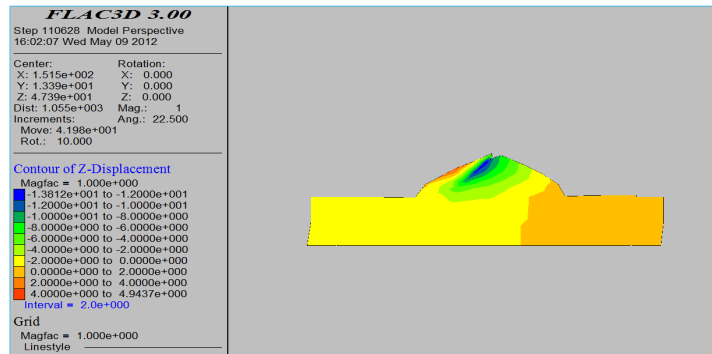


Fig. 8- Modelo de Finn y Martin

Discusión

Al analizar los desplazamientos inducidos en las diferentes etapas de cálculo como se muestran en las figuras 5 , 6 y 7 se puede apreciar que la geometría y las propiedades empleadas en el modelo son adecuadas para el modelo lineal elástico y para tener una noción de como estos desplazamientos se desarrollarían en la realidad

En la Fig. 7 se notan los desplazamientos máximos en el centro de la cortina, tal y como se esperaría en una presa construida por etapas.

En la Fig. 6, la etapa de llenado, se aprecian desplazamientos verticales máximos en el talud aguas arriba de la cortina, producto del empuje hidrostático.

En la Fig. 5 , la etapa en la que se aplicó una excitación en la base de la cimentación , se aprecian que los máximos desplazamientos verticales, se producen en la corona de la presa, lo cual es muy probable debido a que el material se densifica en esa zona producto de la geometría de la misma.

En la Fig. 8 se aprecia el resultado del análisis empleando el modelo de Finn y Martin, que es una adaptación al modelo de Mohr Coulomb, aquí notamos que el terraplén que simula la cortina, falla totalmente, presentando desplazamientos máximos de mas de 4m , lo cual nos indica una falla por licuación.

Conclusiones

Se elaboraron modelos numéricos simples de presas de tierra y enrocamiento, en un inicio se emplearon modelos elásticos lineales para verificar el comportamiento de los mismos antes fuerzas inducidas.

Se plantearon 3 etapas de cálculo, para simular el proceso constructivo de la cortina de una presa, estas etapas fueron:

- 1.- Modelado por capas de 5m de altura.
- 2.- Llenado del embalse
- 3.- Aplicación de la excitación

Posteriormente se modeló una Presa de tierra y enrocamiento aplicándole el modelo de Finn y Martin, ajustando las propiedades para hacerla coincidir con las constantes C1 a C4.

Como puede apreciarse en las figuras de salida del programa FLAC 3D, los modelos numéricos elaborados con el modelo lineal elástico, representan de una manera aproximada el comportamiento real de los materiales que componen la cortina.

Al analizar el problema con el modelo de Finn y Martin, el cual predice las deformaciones permanentes inducidas por cargas cíclicas, se notó, que el modelo falla de manera abrupta, presentándose el fenómeno de licuación, lo cual no está incluido en los alcances de este trabajo.

Por lo tanto, hasta el momento se procederá a realizar un método desacoplado para calcular las deformaciones permanentes y compararlas con un modelo Mohr-Coulomb, el cual ya permite la plastificación del material.

Referencias.

- Porras, V., y Cervantes VR., (1981), "Análisis de presas de tierra y enrocamiento sometidas a temblores", Informe para la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Gazetas, G, and Dakoulas, P., (1991), "Seismic analysis and desing of rockfill dams: state of the art," Soil Dymanics and Earthquake Engineering, pp 27-61.
- Romo M. y Flores-Berrones., R., (1989), "Análisis de la respuesta Sísmica de Presas de Tierra: Experiencia en México", Informe para la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Martin, R., Finn, L, and Seed, H. B., (1975), "Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading" J. Geotech., Div. ASCE, 101(GT5), 423-438,
- Trueba L, Venancio, et al , (1997) "guía simplificada de análisis sísmico en presas", Coordinación de tecnología hidráulica, subdirección de recursos hidráulicos, México D.F.
- Romo M.P., y Magaña R., (1992) "Diseño sísmico de presas de tierra y enrocamiento", Informe para la Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Díaz, J.A., (2005), "Dinámica de suelos," UNAM, México, pp 149-162.
- Marsal, Raul J., (1983), "Presas de tierra y enrocamiento," Limusa, México D.F., pp 421-512.