

Dos grandes presas CFRD en zonas sísmicas

E. Núñez

enunezgeo@yahoo.com.ar

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

RESUMEN: Se consideran algunos aspectos geotécnicos referentes a las presas de Los Caracoles y Potrerillos. Se estudian los valores probables de la resistencia mínima de fluencia en condiciones no drenadas s_u para materiales que constituyen hipotéticos estratos horizontales en los aluviones naturales de la fundación. Para Los Caracoles se estiman los desplazamientos en la cresta luego de un sismo y las deformaciones de la pantalla luego del primer llenado y su incremento con el tiempo. Para Potrerillos se estiman los desplazamientos durante y luego del sismo en función de los valores probables de s_u correspondientes a arenas, o la presencia de limos plásticos subyacentes a la presa. Se concluye que si bien la ejecución de un terraplén de respaldo del espaldón aguas abajo aumenta la estabilidad y reduce los desplazamientos, su construcción no es absolutamente indispensable para la seguridad de la obra.

Palabras clave: CFRD – anisotropía – deformabilidad – sismos – licuación

ABSTRACT: Some geotechnical aspects of the Los Caracoles and Potrerillos dams are considered in this paper. The probable minimum undrained yield strength s_u of hypothetical horizontal layers embedded in the natural alluvium is studied. For the Los Caracoles dam, the after-quake crest displacements and the deformations of the concrete face after first impoundment are estimated. For Potrerillos dam, the displacements during and after the design earthquake are estimated as a function of the probable values of s_u for the sands and silt layers. It is concluded that while the construction of a downstream slope buttress embankment improves the overall stability and reduces displacements, its presence is not a mandatory requirement for the safety of the dam.

Key Words: CFRD – anisotropy – deformability – earthquake – liquefaction

1 INTRODUCCIÓN

Las presas de materiales sueltos “Los Caracoles”, en San Juan, y “Potrerillos”, en Mendoza, se encuentran muy cercanas a fallas activas del cuater-

nario, en localizaciones de alto riesgo sísmico y aguas arriba de muy importantes zonas urbanas. El “terremoto de seguridad” que se empleó en los análisis de verificación de su estabilidad señala magnitudes $M = 7.7$ y aceleraciones máximas del

terreno $PGA = 1.02g$. Estas circunstancias han determinado que los aspectos geotécnicos fueran objeto de especial consideración y continuo examen durante las etapas de diseño y construcción de las obras.

Las Presas denominadas internacionalmente como CFRD (Concrete Face Rockfill Dam) se construyen con materiales incoherentes producto de voladuras en canteras de roca competente o con aluviones gruesos o gravas arenosas provenientes de préstamos cercanos del mismo cauce del río. Los materiales se colocan en capas bien compactadas empleando equipos pesados vibrantes, con el resultado de un terraplén con propiedades globales mecánicas e hidráulicas ortotrópicas, con módulos de deformación y permeabilidad horizontales mayores a los verticales. Los altos valores de fricción interna y altas densidades relativas le otorgan al conjunto una marcada reserva de resistencia no drenada en zonas en donde el material pudiera estar saturado para el caso que actuaran cargas rápidas repetidas. Las características morfológicas de estas presas permiten manejar con comodidad geometrías para la zonificación de los materiales en localizaciones previamente establecidas. El cuerpo de la presa se apoya sobre roca de suficiente resistencia o sobre los aluviones del río si éstos tienen la aptitud mecánica e hidráulica adecuada. En el primer caso la pantalla externa de $H^{\circ}A^{\circ}$ que se apoya sobre el talud agua arriba se continúa con un plinto fijado a la roca de base; en el segundo caso se construye un muro colado empotrado en la roca profunda que se conecta en la parte superior con un plinto “flotante” apoyado en los aluviones cuyo conjunto completa los requerimientos de estanqueidad del cierre. Los materiales altamente compactados de la presa no presentan posibilidades de “licuefacción” pero, en los casos en donde la presa se apoya sobre aluviones naturales, pueden existir estratos o lentes relativamente contiguos de arenas sueltas sumergidas que sí pueden experimentar una gran disminución de su resistencia no drenada bajo cargas pulsatorias, por lo cual es necesario agotar todos los recursos geotécnicos disponibles para asegurarse contra dicho fenómeno que, de ocurrir, puede conducir al colapso de la estructura.

Debido a deformaciones relativas del terraplén, se han producido en algunas obras deterioros considerables de la pantalla de $H^{\circ}A^{\circ}$ aún sin experimentar ningún efecto sísmico, pero en todos los casos informados su reparación se ha podido ejecutar rápidamente y con relativa simplicidad. De cualquier manera, el buen drenaje del cuerpo de la presa tiene que estar asegurado. Para prevenir pérdidas de agua que pueden tener importancia significativa en ríos de

modesto caudal, se emplean en forma creciente membranas “impermeables” convenientemente protegidas contra el choque eventual de objetos flotantes en el lago cuando se produce la acción de grandes olas.

Para abreviar la lista, se citan solamente los trabajos conexos del autor [1-12], en donde se incluyen – en las respectivas referencias – los artículos pertinentes que se refieren globalmente a los temas aquí examinados para su directa consulta.

2 PRESA LOS CARACOLES

La presa se encuentra localizada en la Pcia de San Juan. Está construida con aluviones gruesos naturales del río con taludes 1.5(H):1(V) aguas arriba y 1.7(H):1(V) aguas abajo, una chimenea drenante interior - inclinada hacia aguas arriba y conectada a una solera continua que se prolonga en fajas apoyada en el espaldón aguas abajo. Tiene una altura sobre la superficie de los aluviones naturales de unos 140 m, el espesor de los aluviones naturales subyacentes es de aproximadamente unos 40 m y se apoyan directamente sobre el macizo rocoso de lutitas y grauvacas, por lo cual la distancia aproximada entre la cresta y el nivel inferior de la roca es del orden de los 180 m. La placa de $H^{\circ}A^{\circ}$ se apoya sobre bordillos de hormigón extruido, capa por capa, y dispone de armadura de barras cruzadas de acero conformado en una cuantía no uniforme pero que en conjunto resulta del orden del 0.5%. Se apoya directamente sobre una capa de limos arcillo-arenosos la cual a su vez descansa en aluviones clasificados con fragmentos menores a tamaño grava cumplimentando las condiciones de filtro. La pared de $H^{\circ}A^{\circ}$ moldeada “in situ” está empotrada en la roca y el contacto inyectado con mezclas de cemento a alta presión que se prolonga con una cortina de inyecciones convencional. Hacia el centro inferior del corazón del terraplén se colocaron materiales compactados, originalmente producto de voladuras de las rocas obtenidas por excavación para obras complementarias. La chimenea y solera filtrante está constituida parcialmente por fragmentos de roca similar pero seleccionada – predominantemente grauvacas – y materiales naturales provenientes de los aluviones, en ambos casos, con granulometría controlada. El talud externo del espaldón aguas abajo está protegido por fragmentos gruesos de los aluviones naturales. En la parte inferior del espaldón aguas arriba y por sobre el plinto flotante y placa de $H^{\circ}A^{\circ}$ se colocaron suelos finos que eventualmente

actuarán por infiltración como sello de impermeabilización; este material está protegido por aluviones gruesos. Como se observa, el diseño de la presa sigue en general las pautas convencionales para este tipo de obras que poseen chimenea drenante. La construcción de esta presa finalizó aproximadamente en el año 2008 y esta actualmente en operaciones.

Cuando una presa de materiales sueltos construida en zona sísmica se apoya sobre aluviones naturales densos, es necesario asegurarse que no existen dentro de los aluviones arenas o gravas arenosas incoherentes de baja densidad relativa que constituyan un estrato cuya resistencia no drenada pudiera experimentar una gran disminución para deformaciones importantes, por ejemplo impuestas por la acción de esfuerzos repetidos cuya velocidad de aplicación no permitan el drenaje del material sumergido. Es prácticamente imposible efectuar determinaciones "in situ" de densidad de los materiales incoherentes sumergidos, por lo cual se debe recurrir a ensayos de campo para estimar el valor de la densidad relativa. Como estas determinaciones siempre se ejecutan antes de la construcción de la presa, el valor de la relación de vacíos luego de aplicado el peso de la obra siempre es algo menor al inicial, por lo cual estas determinaciones en general están del lado de la seguridad.

Los ensayos más empleados son los SPT, CPT, CPTU, medición de v_s , existiendo varias correlaciones bastante confiables entre los guarismos que se obtienen en estos ensayos y la densidad relativa. También existen correlaciones entre los valores que se obtienen entre dichos ensayos. Por ej., si se ejecutan ensayos normales de penetración dinámica tales como los SPT, pueden establecerse relaciones entre el cociente de la resistencia al corte no drenada mínima para grandes deformaciones s_u y la presión vertical efectiva p'_v y el valor $(N_1)_{60}$ corregido y de empleo general que llamaremos N . Una expresión aproximada desarrollada por el autor y que aparece como confiable es

$$\frac{s_u}{p'_v} = \frac{N}{100 - 0.8N} \quad (1)$$

Por ej., si el valor corregido del ensayo SPT que se denomina genéricamente es $N = 15$, $s_u / p'_v = 0.17$. Con dicho valor se puede efectuar las correspondientes evaluaciones de estabilidad y deformación.

Los resultados de todas las investigaciones efectuadas en esta presa permitieron asegurar que no exis-

ten materiales incoherentes de baja densidad relativa en el interior de los aluviones de la fundación. Sin embargo, como primer paso en el análisis de la estabilidad del conjunto de la presa, se efectuaron verificaciones sobre situaciones hipotéticas de la existencia de un estrato continuo de arenas poco densas empleando la expresión anterior, siendo el resultado satisfactorio.

Por otra parte, los análisis de estabilidad y deformación del cuerpo mismo de la presa de materiales incoherentes bien compactados pueden ejecutarse mediante los procedimientos numéricos aproximados que se emplean desde la década del '60 y que requieren el uso de computadoras; por su parte, el autor ha presentado anteriormente métodos analíticos aproximados que pueden implementarse con una simple calculadora electrónica. Para este caso, considerando el cociente entre el valor promedio máximo de aceleración y el valor máximo igual a $2/3$, una onda senoidal, con valores de fricción del material granular significativos entre 48° y 52° , el asentamiento probable en la cresta para la máxima aceleración del terreno resulta del orden de 1.6 m y el desplazamiento horizontal 0.45 m en condiciones de embalse lleno. Para el terraplén bien compactado de los aluviones gruesos no existe ninguna probabilidad de licuefacción. En cambio, si existiera el estrato continuo de materiales incoherentes poco densos en el interior de los aluviones de cimentación, el desplazamiento de la presa durante el sismo podría resultar de varios metros, aunque la estabilidad post-sísmica se mantuviera en condiciones aceptables.

Siempre es de interés estimar las deformaciones de la presa en su etapa de construcción y primer llenado. Debido a la muy elevada anisotropía, se estima que la relación de los módulos secantes horizontales E_h y verticales E_v globales es del orden de $n = 4$. Las mediciones en laboratorio de las deformaciones en las probetas, debido a que estaban confeccionadas por sucesivas capas compactadas, apuntaban a que dentro del rango de esfuerzos resultantes el módulo vertical secante se mantenía sin una variación muy acusada; esta circunstancia había sido observada en otros ensayos efectuados sobre probetas compactadas en capas. Un ejemplo simple permite asimilar este efecto si se imagina la acción de una determinada carga específica sobre un libro: en la dirección normal a los folios la deformación específica es mayor que en la dirección paralela. Si se representa en ordenadas los esfuerzos y en abscisas las deformaciones unitarias, la curva resultante aparece con una forma de S. Como la

presa efectivamente se construye por capas, es de esperar esta anisotropía entre los módulos, constatada en las mediciones de los asentamientos experimentados durante la construcción que permitieron una estimación para E_v del orden de los 35 a 45 MPa. Pero los desplazamientos normales al plano de la pantalla no resultan según el valor de E_v sino del correspondiente al módulo secante direccional E_d . Teniendo en cuenta la rotación de las presiones principales y la morfología de la presa, puede estimarse que el valor del cociente E_d/E_v es apreciablemente mayor a 1. En este caso la estimación es del orden de 3 por lo que el desplazamiento máximo en el sentido normal a la pantalla para el primer llenado correspondiente al terraplén mismo, puede estimarse en

$$\delta_v = \frac{1}{4} \cos(33.7^\circ) \cdot E_d \cdot H^2 \quad (2)$$

A este valor debe sumarse la deformación propia de los aluviones de apoyo que resulta no mayor a unos 10 cm. Por tanto, es de prever que la deformación máxima de la pantalla para el primer llenado resulte del orden de los 40 á 50 cm. Debido al comportamiento reológico de los materiales granulares, es de esperar que dichas deformaciones aumenten con el tiempo según una expresión aproximada

$$\log\left(\frac{d_t}{d_0}\right) = \frac{1}{6} \log(1+t) \quad (3)$$

siendo d_t la deformación para el tiempo t , d_0 la deformación después del primer llenado, t el tiempo en años. Según esta previsión, el desplazamiento máximo de la pantalla en el sentido normal, transcurridos unos 10 años, podría incrementarse en un 50%.

3 PRESA POTRERILLOS

La presa se encuentra localizada en la Provincia de Mendoza. Está construida con los aluviones gruesos naturales del río Mendoza con taludes 1.5(H):1(V) aguas arriba y 1.8(H):1(V) aguas abajo; los otros detalles morfológicos – salvo el enrocado central colocado en la parte interna inferior del cuerpo del terraplén – son similares a la presa Los Caracoles. Tiene una altura sobre la superficie de los aluviones naturales de unos 120 m; el espesor de los aluviones de cimentación es variable, pero puede simplificarse suponiendo un espesor promedio del orden de los 40

m. La construcción de esta presa fue finalizada hacia el año 2002 y está actualmente en plena operación.

Con la presa en un estado avanzado de construcción se inició una controversia sobre la existencia de un estrato de materiales susceptibles de licuefacción dentro de los aluviones gruesos sobre los que se apoya la presa, localizado a lo largo de la fundación y a unos 30 m de profundidad respecto del plano de apoyo. Los resultados de dos perforaciones ejecutadas aproximadamente al pie del talud aguas abajo indicaron la presencia de tres capas de materiales diferentes a los aluviones naturales gruesos: una capa de arcillas duras de aproximadamente 0.5 á 1.0 m de espesor; suprayacentes, limos plásticos ML con un espesor de aproximadamente 3 m y por encima, arenas limosas SM. El espesor del conjunto se estimaba – correlacionando los resultados cualitativos obtenidos en otras operaciones de perforación profunda – variable entre 1 a 7 m. Una opinión fue que la capa estaba constituida por un manto continuo y licuable; la otra opinión fue que dichos materiales eran dinámicamente estables y con cierta cementación debido a “envejecimiento”, y no constituían un estrato continuo. De cualquier manera, se ordenó la ejecución de un terraplén de respaldo del espaldón aguas abajo de unos 20 m de altura para asegurar la estabilidad de la obra frente a la acción del sismo máximo.

La controversia se basó en los resultados de los ensayos SPT obtenidos en las dos perforaciones ya indicadas. Como el número de ensayos era muy reducido, el autor – que fue llamado a actuar como Perito Designado – consideró los valores medios disponibles afectándolos con coeficientes de minoración: para los limos plásticos ML, $N = 15.5$ y para las arenas SM, $N = 25$.

Para los limos plásticos ML se comparó el valor de la cohesión no drenada que se obtiene de deducciones analíticas y correlaciones disponibles para suelos cohesivos sumergidos localizados a 30 m de profundidad, y las que pueden estimarse a partir del ensayo SPT. En ambos casos resultan, sin la acción gravitante de la presa:

$$S_{uo} = 0,22p'_v \times 0,48 \text{ MPa} = 0,1 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$S_{uo} = 4/3 \times N \times 1/2 = 4/3 \times 15,5 \times 1/2 = 0,1 \text{ MPa} \quad (5)$$

Mientras se construye la presa, los limos plásticos consolidan, pudiendo estimar el tiempo de consolidación en aproximadamente algo más de un año lo que significa que la velocidad de consolidación es del orden de la velocidad de incremento de cargas

verticales efectivas producido por la construcción del terraplén. Por tanto, luego de completado el terraplén el valor medio de s_u resulta del orden de 40 t/m², valor que corresponde a un material no licuable con resistencia al corte no drenada suficiente para absorber las acciones horizontales del agua con el embalse lleno para la condición post-sísmica.

De igual manera, si se aplica la ecuación (1) para las arenas resulta $s_u/p'_v = 0,3$, si se considera para dichas arenas $N = 15,5$, el valor de s_u/p'_v resulta aproximadamente 0,18. Por tanto, y con estos valores, la presa resulta estable para la condición post-sísmica aún considerando la hipótesis más desfavorable.

La estimación de las deformaciones del terraplén considerado en sí mismo indica que el asentamiento de la cresta es del orden de los 2 m +/- 30% y el desplazamiento horizontal hacia aguas abajo es del orden de 0.5 m a 0.7 m. Durante el sismo, y teniendo en cuenta la existencia del hipotético estrato continuo de material más débil, k_c es del orden de 0.2 para $N = 25$ y el corrimiento hacia a.abajo con embalse lleno resulta aproximadamente 1.2 m a 1.5 m; pero para $N = 15,5$, k_c es del orden de 0.09 y el corrimiento a.abajo resultaría algo mayor a los 3 m.

La conclusión de las anteriores evaluaciones fue que la construcción del terraplén de respaldo aguas abajo no era indispensable para la seguridad de la presa, pero si se asegura un buen drenaje del apoyo de dicho terraplén, su existencia significa un mayor grado de estabilidad y menores desplazamientos.

Todos los valores numéricos anteriormente presentados pueden ser obtenidos empleando las referencias indicadas al final de este artículo

4 CONCLUSIONES

Las presas CFRD directamente apoyadas en un macizo rocoso competente, cuando están bien compactadas y drenadas, son seguras frente a eventuales colapsos, pero cuando el valor del PGA es muy elevado, la pantalla de H°A° experimentará deterioros que probablemente obliguen al descenso del lago para proceder a su reparación.

Lo mismo puede decirse de las presas apoyadas sobre aluviones densos, aunque es de esperar mayores asentamientos. Siempre deben agotarse todos los recursos que dispone la geotecnia para asegurarse que no existan estratos continuos licuables bajo la fundación.

La existencia de estratos incoherentes de mediana densidad relativa bajo las presas no significa necesari-

amente que la obra resultará inestable bajo fuertes sismos, pero es absolutamente necesario efectuar una investigación que se extienda a la totalidad del área interesada empleando todos los recursos y ensayos disponibles para permitir una correlación segura.

Aun cuando no se consideren las acciones sísmicas, las evaluaciones sobre deformabilidad durante la construcción y para el primer llenado deben tener en cuenta los efectos que la anisotropía - inherente a los métodos constructivos - produce en los valores de los módulos direccionales de deformación del terraplén compactado en capas.

5 AGRADECIMIENTOS

El Autor quiere manifestar su agradecimiento a los Profesores Alejo Sfriso y Alejandro Verri por su permanente disposición para la discusión crítica de muchos de los temas aquí examinados.

6 REFERENCIAS

- [1] Nuñez, E. 1984. Caracterización de suelos. 8°CAMSIF, Neuquén, V.3.
- [2] Nuñez, E. 1988. Determinación de densidades in situ en suelos incoherentes a partir de mediciones de la velocidad de la onda de corte. XCAMSIF, La Plata.
- [3] Nuñez, E. 1989. Comportamiento Mecánico de Suelos. SAMS Conferencia Auditorio SADE.
- [4] Nuñez, E. 1991. Propiedades mecánicas de materiales granulares incoherentes. Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Tomo 46.
- [5] Nuñez, E. 1999. Deformación de la pantalla de hormigón en presas de materiales sueltos. Boletín SAIG N° 38.
- [6] Nuñez, E. 1999. Presa de aluviones naturales con pantalla de hormigón sobre el río Nogolí-San Luis-Argentina (en colaboración). XI PCSMGE, Foz de Iguazú, Brasil.
- [7] Nuñez, E. 2000. Presas de enrocado con pantalla de hormigón agua arriba. Boletín SAIG N° 41.
- [8] Nuñez, E. 2000. Estimación del Asentamiento de la cresta de una presa de enrocado bajo acción sísmica. Publicación del autor de circulación limitada.

- [9] Nuñez, E. 2006. Estimación de Asentamientos por acción sísmica en presas de enrocado. XIII COBRAMSEG/SBMR-Vol.4.
- [10] Nuñez, E. 2006 Presas de enrocado : Estimación de asentamientos por acción sísmica. XVIII CAMSIG, San Juan, Argentina.
- [11] Nuñez, E. 2006. Desplazamientos en taludes constituidos por aluviones gruesos cementados sometidos a terremotos. XVIII CAMSIG, San Juan, Argentina.
- [12] Nuñez, E. 2007. Incertidumbres y Aproximaciones en Geotecnia(2007). VI Arthur Casagrande Lecture, XIII CPMSIG, Margarita, Venezuela.
- [13] Nuñez, E. 2007. Behavior of coarse alluvium slopes subjected to earthquakes. XIII PCSMGE, Venezuela.
- [14] Nuñez, E. 2008. Métodos analíticos aproximados para el cálculo en geotecnia. Seminario Internacional de Geomecánica Computacional Fi-UBA, Buenos Aires.
- [15] Nuñez, E. 2008. Certezas y Discrepancias en Geotecnia. Conferencia Bolognesi CAMSIG XIX, La Plata, Argentina.
- [16] Nuñez, E. 2009. Resistencia no drenada y licuación en arenas. Conferencia en FI-UBA, Buenos Aires.