



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

manuela@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago
de Cuba

Cuba

Vázquez-Ballester, Yanet; Beira-Fontaine, Eduardo
PROPUESTA DE PENDIENTE DE TALUD DE PRESAS DE COLAS
PARA ASEGURAR LA DISMINUCIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES
Ciencia en su PC, vol. 1, núm. 2, 2018, Abril-Junio 2019, pp. 47-57
Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358410005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

PROPUESTA DE PENDIENTE DE TALUD DE PRESAS DE COLAS PARA ASEGURAR LA DISMINUCIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES

APPROACH OF SLOPE OF TAILINGS WATER DAM TO ENSURE THE REDUCTION OF DISASTER RISKS

Autores:

Yanet Vázquez-Ballester, yvazquezb@uho.edu.cu. Universidad de Holguín, Departamento de Construcciones. Holguín, Cuba.

Eduardo Beira-Fontaine, manager@vlir.uo.edu.cu. Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

La falla de los taludes de presas de colas o relave minero puede poner en riesgo la vida de miles de personas y causar cuantiosos daños al medioambiente, por lo que estos deben permanecer estables. El objetivo del presente trabajo fue determinar las pendientes de los taludes aguas abajo de la presa de colas Yagrumaje, de modo que admitan factores de seguridad estables, tanto estáticos como dinámicos, para los métodos de construcción aguas abajo y línea central. Para ello se empleó el software Geostudio 2007 y se realizó análisis de filtración, análisis estático y dinámico a través del método pseudoestático. Con la variación de la pendiente del talud y los coeficientes sísmicos horizontales se obtuvo la variación que sufre el factor de seguridad de condición estática a dinámica de esta estructura. De esta manera se logra proponer las pendientes de taludes ideales para asegurar la disminución de riesgos de desastres.

Palabras clave: riesgo, presas de colas, método pseudoestático, factores de seguridad.

ABSTRACT

The failure of the tailings water dam or mine tailings dam can put at risk the lives of thousands people and cause considerable damage to the environment, so they must remain stable. The objective of this work was to determine the slopes of downstream of the Yagrumaje tail water dam that admit stable static and dynamic safety factors for the downstream and central line construction methods. Geostudio 2007 computing program was used taking into account seepage, static and the dynamic analysis through the pseudo-static method. With the variation of the slope and horizontal seismic coefficients, the variation suffered by the safety factor from static to dynamic condition of this structure was obtained. The secure slopes for this kind of structure under seismic effect is presented which can ensure the reduction of disaster risks.

Key words: risk, tails water dam, pseudostatic method, safety factors.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la actividad minera hizo necesario llevar a cabo la construcción de presas de relave, las cuales tienen como objetivo almacenar los residuos sólidos del proceso minero-metalúrgico. Las presas de colas poseen similitud con las presas de agua, pues su objetivo principal es almacenar. La diferencia más importante es que se construyen progresivamente, a lo largo de todo el período de explotación minera. Deben crecer gradualmente en altura, con los mismos residuos o con otro material de préstamo, al ritmo de producción de residuos de una mina.

La ocurrencia de un sismo trae consigo afectaciones en las presas de colas; por tanto, estas pueden producir perjuicios tanto socioeconómicos como ambientales. El derrame de las colas debido a la ruptura de las instalaciones en las que estos residuos se almacenan o de los conductores que frecuentemente se usan para su transportación alcanza su máxima peligrosidad ante la ocurrencia de terremotos. Los daños en las vías de comunicaciones debido a los deslizamientos de tierra constituyen un fenómeno de alta peligrosidad, con afectaciones en las vías cercanas cuando son obstruidas.

Estos daños originan afectaciones individuales, familiares o a grupos sociales, ya que cualquier daño ocurrido al medio natural o construido repercute directa o indirectamente en el hombre.

Es por esto que las presas de colas deben permanecer estables durante toda su vida, ya sea de manera estática o dinámica, debido al alto peligro que estas pueden provocar al medioambiente y a la población.

Actualmente, en la provincia cubana de Holguín en el municipio de Moa existen tres presas de colas. Una corresponde a la empresa Comandante Ernesto Che Guevara; otra, a la empresa Comandante Pedro Sotto Alba; la tercera, inactiva, transformada en pasivo ambiental desde 1970. Hay otra en proceso de diseño y construcción, la presa Yagrumaje. Las mismas están expuestas a movimientos sísmicos debido a la cercanía a las zonas sismo-generadoras Oriente, Cauto–Nipe, Sabana o Norte Cubana y Norte de la Española. Estudios realizados por especialistas del Cenais (Noas, Vega, Ríos, Chuy, 2016) fundamentan que las mayores percepciones sismológicas en la región se registran desde 1992 hasta 1998, con sismos de magnitudes entre 3.2, 4.5, 5.6 en la escala de Richter.

Otros autores (Rodríguez, 2002; Hernández, 2015) hacen referencia a tres sismos registrados en Moa en los años 1995, 1996 y 1998 de intensidad de 4 y 5.3 grados, que provocaron grietas en la balsa de residuo, inactiva, construida por la empresa Comandante Pedro Soto Alba. Además, justifican que una de las causas asociadas al fallo o rotura de las presas de residuos es la pérdida de estabilidad, lo que trae consigo la contaminación ambiental y afectaciones socioeconómicas; de ahí que el análisis de la estabilidad de las presas de colas del territorio es fundamental.

Por lo que se hace necesario concentrar los residuos mineros en una ubicación de óptimas condiciones para poder lograr la estabilidad de las presas de colas; de ahí que el objetivo del presente trabajo fue determinar y proponer las pendientes de los taludes aguas abajo de la presa de colas Yagrumaje del municipio de Moa, provincia de Holguín, en condiciones estáticas y dinámicas que aseguren la disminución de riesgos de desastres para los métodos de construcción aguas abajo y línea central.

METODOLOGÍA

El análisis seudoestático permite calcular un factor de seguridad de un dique bajo la influencia de una carga sísmica. Martínez, Barrera y Gómez (2011) plantearon que este método utiliza el mismo procedimiento general que cualquiera de los métodos de equilibrio límite convencional, con la diferencia de que se incluyen fuerzas seudoestáticas horizontales (F_h) y verticales (F_v) debidas al evento sísmico. Los análisis seudoestáticos representan los efectos de las vibraciones de un terremoto mediante aceleraciones seudoestáticas que producen fuerzas inerciales F_h y F_v , las cuales actúan a través del centroide de la masa de falla.

Las magnitudes de las fuerzas seudoestáticas se indican en las ecuaciones I y II (Kramer, 1996):

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (I)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (II)$$

donde: a_h y a_v son las aceleraciones horizontales y verticales, k_h y k_v son coeficientes seudoestáticos horizontales y verticales adimensionales (coeficientes sísmicos), y W es el peso de la masa de falla.

Jibson (2011) plantea la ecuación III para realizar el cálculo del factor de seguridad por el método seudoestático.

$$FS = \frac{[(W \cos \alpha - k W \sin \alpha) \tan \theta]}{(W \sin \alpha + k W \cos \alpha)} \quad (III)$$

donde:

W peso de la masa de falla

α ángulo de inclinación de la superficie de deslizamiento del talud

θ ángulo de fricción del material de talud

k coeficiente sísmico

Para lograr desarrollar el método seudoestático se hace necesario determinar el coeficiente sísmico. Ruesta, Díaz y Alva (1988) señalan que la acertada selección del coeficiente sísmico constituye uno de los mayores problemas y establecen que el coeficiente sísmico a utilizarse en el diseño de una presa está influenciado por factores como la sismicidad de la zona, las condiciones de cimentación, la altura y propiedades de los materiales, así como la importancia de la estructura y riesgo de daños aguas abajo.

Para obtener los valores de coeficientes sísmicos horizontales se realizó un análisis bibliográfico de diversos autores. Algunos de ellos tienen en cuenta la aceleración del terreno. Por ejemplo:

Terzaghi (1950) propone que $k_h=0.1$ para sismos severos, $k_h=0.2$ sismos severos y destructivos y $k_h=0.5$ sismos catastróficos.

Japón plantea factores de seguridad mayores que 1.0, los coeficientes se encuentran entre $k_h=0.15$ a $k_h=0.25$.

Estado de California propone $k_h=0.05$ a $k_h=0.15$.

Noda y Uwave (1979) proponen que $k_h=a_{\max}/g$ si $a_{\max} \leq 2 \text{ m/s}^2$ y $k_h=0.33(a_{\max}/g)^{0.33}$ si $a_{\max} > 2 \text{ m/s}^2$.

Seed (1979), $k_h=0.10$ para $FS_{\text{sísmico}} \geq 1.15$ y $k_h=0.15$ para $FS_{\text{sísmico}} \geq 1.15$ con un 20 % de reducción de resistencia a grandes deslizamientos y sitios cercanos a fuentes sísmicas, capaz de generar un sismo de magnitud 6.5 y 8.5 respectivamente.

Seed (1980), $k_h=0.15$, $FS_{sismo} \geq 1.15$ siempre que no exista pérdida significativa de resistencia de los materiales durante el sismo (suelos arcillosos, arenas drenadas y suelos no cohesivos densos); además, sugiere verificar las deformaciones con el método de Newmark (1965).

Marcuson (1981), $k_h=0.33a_{m\acute{a}x}/g$ a $k_h=0.5a_{m\acute{a}x}/g$ $FS>1$ considera posible amplificación o amortiguamiento.

Cuerpo de ingenieros (1982) plantea $k_h=0.10$ sismo importante, $FS>1.0$ y $k_h=0.15$ sismo de gran magnitud, $FS>1.0$

Krinitzsky *et al* (1993), Taniguchi y Sasaki (1996) recomiendan $k_h=0.65a_{m\acute{a}x}/g$ para deslizamiento de magnitud intermedia.

Seed y Martin (1966), Dakoukas y Gazetas (1986) proponen $k_h=a_{m\acute{a}x}/g$ para un talud pequeño y $k_h=0.65a_{m\acute{a}x}/g$ para deslizamiento de magnitud intermedia.

Hynes-Griffing y Franklin (1984) consideran $k_h=0.5a_{m\acute{a}x}/g$ para presas y con $FS=1$, y un 20 % de reducción de resistencia, concluyó que la presa no estará sujeta deformaciones importantes.

Saragoni (1993) propone $k_h=0.3 a_{m\acute{a}x}/g$ si $a_{m\acute{a}x} \leq 6.7 \text{ m/s}^2$ y $k_h=0.22(a_{m\acute{a}x}/g)^{0.2}$ si $a_{m\acute{a}x} > 6.7 \text{ m/s}^2$.

Kramer (1996) $k_h = 0.5a_{m\acute{a}x}/g$ apropiado para muchos taludes, pero que acota que no es una regla general.

Division of Mines and Geology, California, (1997) propone $k_h = 0.15$.

La norma cubana NC 46:2014 plantea los valores de aceleración máxima del suelo para todos las provincias y municipios de Cuba. El municipio de Moa, provincia Holguín, tiene un valor es 0.227g. Con este valor se determinó la aceleración máxima del suelo de la zona de estudio, se obtuvo un de 0.216 g. Con la sustitución de este valor en los k_h anteriormente analizados, que consideran la aceleración del suelo, se obtuvieron valores de k_h que se encuentran entre 0.10, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.20 y 0.30. No se escoge el valor de 0.5 porque solo se utiliza para sismos catastróficos y la zona de estudio es de sismos moderados.

RESULTADOS

Para lograr determinar los factores de seguridad en condiciones estáticas y dinámicas de los taludes de la presa de colas Yagrumaje del municipio de Moa,

Holguín, se hace necesario realizar inicialmente a través del *software* Geostudio 2007 un análisis de filtración mediante la herramienta *SEEP/W Analysis (Steady-State)*, un análisis estático *Slope/ W Stability* y un análisis dinámico con una carga sísmica horizontal a través de la herramienta *KeyIn, Seismic Load*.

Para realizar este análisis se recrearon las mismas condiciones en las que estará sometida la presa. Se analizaron por fases cada una de las variantes, teniendo en cuenta el nivel de agua en el embalse. Se introducen las propiedades de los materiales.

En la figura 1 se observa cómo la línea de corriente superior (nivel freático) atraviesa la laterita, la cola y descarga en el punto inferior de la capa filtrante de arena, el flujo de infiltración está en la zona saturada y las presiones de agua disminuyen. Con la ayuda de *SEEP/W* se determinó la línea piezométrica que se requirió para la modelación de la estabilidad de los taludes con el *SLOPE/W*, lo que garantiza taludes estables y seguros.

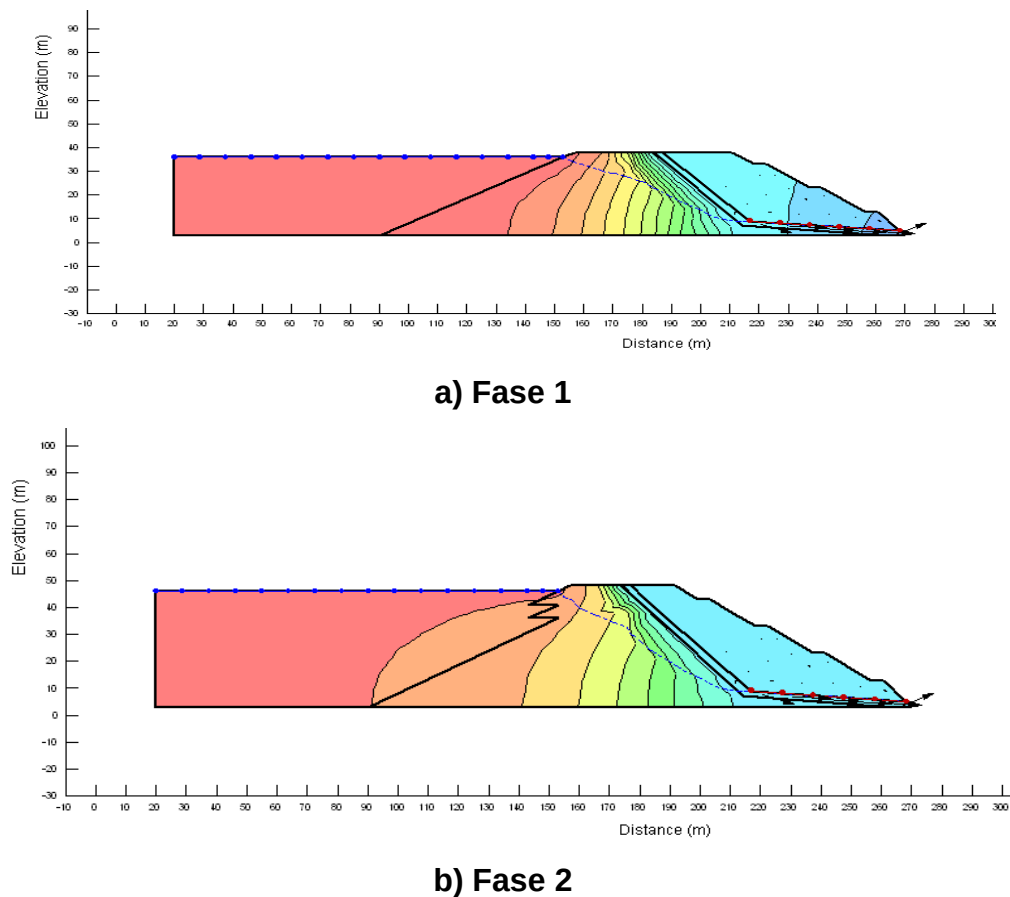


Figura 1. Resultados del análisis de filtración en las dos primeras fases de construcción de la presa de colas con el método de construcción línea central. (Fuente: Elaboración propia)

Para realizar el análisis estático se considera el análisis de filtración antes realizado. Luego se crea un nuevo modelo, especificando el tipo de análisis, en este caso el de equilibrio límite. Se especifica el método por el cual el *software* realizará el análisis del factor de seguridad estático. El *software* brinda la posibilidad de ofrecer resultados por los métodos Morgenstern-Price, Ordinario, Bishop y Janbu. En este caso fue analizado por el método Morgenstern-Price, pues tiene en cuenta los momentos y las fuerzas de equilibrio, no así los otros métodos. Se especifica el modelo del material Mohr-Coulomb, se le asignan los materiales y sus propiedades. Se corre el programa en cada una de las fases y se obtienen los factores de seguridad estáticos. La tabla 1 muestra un resumen de los resultados obtenidos del factor seguridad ante condición estática para los métodos de construcción aguas abajo y línea central.

Tabla 1. Resumen del factor de seguridad ante condición estática para cada método de construcción (Fuente: Elaboración propia)

Aguas Abajo		Línea Central	
Relación de taludes	FS _E	Relación de taludes	FS _E
Talud 1.5:1	1,151	Talud 1.5:1	1,407
Talud 2:1	1,404	Talud 2:1	1,701
Talud 2,5:1	1,657	Talud 2,5:1	1,818
Talud 3:1	1,905	Talud 3:1	1,965
Talud 3,5:1	2,143	Talud 3,5:1	2,552
Talud 4:1	2,388	Talud 4:1	2,75

Como se observa en la tabla 1, para la variante aguas abajo en las dos primeras relaciones de taludes los factores de seguridad estáticos son menores que 1.5. Por tanto, para estas relaciones los taludes de la presa de colas Yagrumaje no son estables estáticamente. Sin embargo, para el resto de las relaciones el factor de seguridad estático aumenta progresivamente a medida que se incrementa la relación de los taludes aguas abajo de la presa.

En el método de construcción línea central, en la primera relación de talud 1.5:1 el factor de seguridad estático es menor que 1.5, no siendo así para el resto de

las relaciones de taludes; sin embargo, los taludes a partir de la relación 2:1 hasta 4:1 manifiestan estabilidad.

Luego, se realiza el análisis dinámico con los valores de coeficientes sísmicos horizontales (k_h) como cargas sísmicas. Este trabajo se realizó para cada variante de método de construcción analizada, método aguas abajo y método línea central, variando los coeficientes sísmicos horizontales y las relaciones de taludes de la presa aguas abajo.

Método de construcción aguas abajo

Tabla 2. Factores de seguridad ante acciones dinámicas para el método de construcción aguas abajo. (Fuente: Elaboración propia)

Método de Construcción Aguas Abajo						
Coeficientes sísmicos horizontales	FSD Relación de talud 1,5:1	FSD Relación de talud 2:1	FSD Relación de talud 2,5:1	FSD Relación de talud 3:1	FSD Relación de talud 3,5:1	FSD Relación de talud 4:1
$K_h=0,10$	0,928	1,096	1,249	1,39	1,512	1,625
$K_h=0,12$	0,892	1,047	1,188	1,316	1,425	1,525
$K_h=0,13$	0,874	1,024	1,16	1,28	1,384	1,479
$K_h=0,14$	0,860	1,002	1,132	1,249	1,364	1,436
$K_h=0,15$	0,843	0,981	1,106	1,217	1,21	1,395
$K_h = 0,2$	0,767	0,884	0,988	1,080	1,162	1,220
$K_h = 0,3$	0,641	0,73	0,806	0,871	0,928	0,974

Como se puede apreciar en la tabla 2, para la variante método de construcción aguas abajo las relaciones de taludes 1.5:1 y 2:1 son las más desfavorables, pues para todos los coeficientes sísmicos horizontales analizados el factor de seguridad dinámico es menor que 1, valor límite del F_s a considerar para asegurar estabilidad. Este resultado era esperado, por cuanto para la condición estática no resultaban estables.

No obstante, para un mismo valor de coeficiente sísmico horizontal, a medida que aumenta la relación de los taludes aguas abajo aumentan los factores de seguridad; resultado que era de esperar, pues una de las medidas utilizadas para mejorar la estabilidad de taludes es tender los mismos.

Como el valor promedio de coeficiente sísmico horizontal para la zona estudiada es $k_h=0.13$; por tanto, analizando la Tabla 2, los taludes de esta presa deben tener pendiente de 2.5:1 o mayor, para asegurar su estabilidad para este coeficiente sísmico. Las relaciones de taludes 2.5:1 y 3:1 son inestables para k_h entre 0.2 y 0.3; sin embargo, para valores de $k_h = 0.3$ ninguna relación de talud será estable ante evento sísmico.

Método de construcción línea central

Tabla 3. Factores de seguridad ante acciones dinámicas para el método de construcción línea central. (Fuente: Elaboración propia)

Método de Construcción Línea Central						
Coeficientes sísmicos horizontales	FS _D Relación de talud 1,5:1	FS _D Relación de talud 2:1	FS _D Relación de talud 2,5:1	FS _D Relación de talud 3:1	FS _D Relación de talud 3,5:1	FS _D Relación de talud 4:1
$k_h=0,10$	1,109	1,338	1,478	1,59	1,817	1,84
$k_h=0,12$	1,088	1,279	1,406	1,568	1,717	1,791
$k_h=0,13$	1,078	1,25	1,372	1,54	1,688	1,775
$k_h=0,14$	1,054	1,223	1,34	1,502	1,643	1,728
$k_h=0,15$	1,037	1,197	1,31	1,483	1,601	1,679
$k_h = 0,2$	0,906	1,077	1,174	1,312	1,45	1,59
$k_h = 0,3$	0,608	0,773	0,912	0,991	1,137	1,262

La tabla 3 muestra los resultados de factores de seguridad ante acciones dinámicas para la variante método de construcción línea central. La relación de talud 1.5:1 es la más desfavorable, pues para todos los coeficientes sísmicos horizontales analizados el factor de seguridad dinámico es menor que 1, valor límite del F_s a considerar para asegurar estabilidad.

A partir de la relación de talud 2:1 en adelante los taludes de la presa de colas Yagrumaje comienzan a ser estables ante acciones dinámicas para $k_h = 0.13$. El talud 2:1 comienza a ser inestable para k_h entre 0.2 y 0.3. Los taludes 2.5:1 y 3:1 son inestables para $k_h=0.3$. Sin embargo, las relaciones de taludes 3.5:1 y 4:1 permanecen estables para todas las variaciones de coeficientes sísmicos horizontales.

En cuanto a los métodos de construcción, la mayor respuesta la ofrece el método constructivo línea central, pues a partir de la relación de talud 2:1 los FS dinámicos se mantienen mayores que uno para $k_h=0.13$. Comparando el método de construcción aguas abajo en todo momento, para $k_h=0.3$ los taludes de la presa son inestables; no obstante, para el método línea central los taludes de la presa son estables completamente para relaciones de taludes 3.5:1 y 4:1. Las tablas 2 y 3 resultan muy útiles a la hora de definir la pendiente de talud a utilizar para ambos métodos constructivos, según varíe el coeficiente sísmico horizontal, lo que permite a los inversionistas definir este parámetro en sus proyectos de colas en Yagrumaje.

CONCLUSIONES

1. El análisis de estabilidad de taludes de la presa de relave minero Yagrumaje, realizado mediante el *software* Geoestudio 2007 a través del empleo del método pseudoestático, permitió determinar las pendientes de los taludes aguas abajo a través de los resultados de estabilidad de los factores de seguridad estáticos y dinámicos para los métodos de construcción aguas abajo y línea central. Con ello la potencialidad de riesgos de desastres fue determinada.
2. En el análisis estático para la variante de construcción aguas abajo los taludes de la presa de colas se comportan inestables para las relaciones de taludes 1.5:1 y 2:1, pues los FS estáticos son menores que 1.5, por lo que estos valores de pendientes no son ideales para la construcción. No siendo así a partir de las relaciones de taludes 2.5:1, 3:1, 3.5:1 y 4:1, donde el factor de seguridad estático aumenta progresivamente, por lo que la presa es estable. En la variante línea central para la relación de talud 1.5:1 la presa es inestable, pero mejora a partir de la relación 2:1 en adelante.
3. Los resultados del análisis dinámico arrojaron que en la variante método de construcción aguas abajo, para $k_h=0.13$ las relaciones de taludes que permanecen estables son a partir de 2.5:1 y que para $k_h=0.30$ ninguna relación de talud es estable. Para la variante línea central a partir de la relación de talud 2:1 para k_h entre 0.13 y 0.15 los taludes son estables, de ahí en adelante dejan de serlo. Por lo que para las relaciones de

taludes 2.5:1 y 3:1 los taludes son estables hasta $kh=0.3$ y a partir de este son inestables.

4. Los taludes con pendientes 3.5:1 y 4:1 resultan estables para cualquier coeficiente sísmico horizontal en el sistema de línea central, lo cual sugiere que siempre debe ser utilizado este método constructivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hernández Columbié, T. (2015). *Sistema de gestión de riesgos por fallo en la presa comandante Pedro Soto Alba* (Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas).
- Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes”—A retrospective. *Engineering Geology*, 122, 43-50.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.
- Martínez, R., Barrera, S. y Gómez, P. (2011). El método pseudoestático de estabilidad en presas: un análisis crítico. *Revista Obras y Proyectos*, 9, 30-37.
- Noas, J. L., Vega, G. N., Ríos, M. Y., Chuy, R. T. (2016). *Reporte de investigación, evaluación del peligro sísmico del área de ubicación de la empresa Moa Níkel SA*. Santiago de Cuba: Cenais – Citma.
- Rodríguez Pacheco, R. (2002). *Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba). Influencia del comportamiento hidromecánico*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ruesta Ruíz, P., Díaz Collantes, J., Alva Hurtado, J, A. (septiembre, 1988). El coeficiente sísmico en el diseño de presas de tierra y enrocado. Ponencia presentada en el VII Congreso de Ingeniería Civil (pp.5-11). Huaraz, Perú.
- SLOPE/W (2007). *Slope stability analysis*. GeoStudio, GeoSlope International. Canada.

Recibido: junio de 2017

Aprobado: diciembre de 2017