

FACTORES DE SEGURIDAD ANTE ACCIONES DINÁMICAS DE LOS TALUDES DE LA PRESA DE COLA YAGRUMAJE

DYNAMIC SAFETY FACTORS OF YAGRUMAJE TAILING SLOPE DAMS

Yanet Vázquez Ballester¹, Eduardo Beira Fontaine²

¹Universidad de Holguín, Cuba, yvazquezb@uho.edu.cu, ²Universidad de Oriente, efontain@uo.edu.cu

RESUMEN

Las fallas de los taludes de las presas de colas pueden poner en riesgo la vida de miles de personas y causar cuantiosos daños al medioambiente, por lo que, ante la acción dinámica, estos deben permanecer estables. Es por esto que, se hace necesario definir los factores de seguridad de los taludes ante acciones dinámicas de la nueva presa de cola Yagumaje del municipio de Moa de la provincia de Holguín. El objetivo del trabajo fue determinar los factores de seguridad estáticos y dinámicos de los taludes con cimentación rígida de la presa de cola Yagumaje para los métodos de construcción aguas abajo y línea central. Se trabajó con el software Geoestudio 2007 y el análisis dinámico se realizó a través del método seudoestático con la variación de los coeficientes sísmicos horizontales. A partir de establecer diferentes pendientes de talud y coeficientes sísmicos horizontales, se obtuvo la variación que sufre el factor de seguridad de la condición estática a la dinámica, lo cual facilita conocer la disminución que el efecto sísmico produce en la estabilidad de estas estructuras. Se proponen una serie de ábacos de variación del factor de seguridad para la condición estática y dinámica contra la altura de la presa y los coeficientes sísmicos horizontales para las variantes analizadas. Esto permite a especialistas y proyectistas de presas de colas, realizar diferentes diseños bajo condiciones dinámicas sin necesidad de disponer del software Geoestudio 2007.

Palabras claves: taludes; presas de colas; factores de seguridad; seudoestático; análisis dinámico.

ABSTRACT

The failure of the slopes of these structures can put on risk thousands of people's life and provoke a considerable damage to the environment, which is the reason why they must remain stable to dynamic action. So it is necessary to define the security factors from the slopes under dynamic actions of the Yagumaje dam from Moa in Holguin province. The objective of this work was to determine the static and dynamic factors of safety of the slopes with rigid foundation of the Yagumaje dam for the construction methods downstream and central line. In order to achieve this goal, it was employed Geostudio 2007 and the dynamic analysis was accomplished through the pseudo-static method with the variation of the seismic horizontal coefficients. Starting from establishing different ratios of slope and seismic horizontal coefficients was obtained the variation of the factor of safety from the static condition to the dynamic, which makes it easy to know the decrease that the seismic effect produces in the stability of these structures. It was offered a series of abacuses of variation of the factor of safety for the static and dynamic conditions against the height of the dam and the seismic horizontal coefficients for the construction methods downstream and central line. This allows specialists and designers of dams of tails accomplishing different designing's under dynamic conditions without need to have the software Geoestudio 2007.

Keywords: slopes; tailing dams; security factors; pseudostatic; dynamic analysis

1. 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 llamadas cola. Las presas de cola, poseen similitud a las presas de agua pues su objetivo principal es almacenar, y 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 la mina.

Las colas están mezcladas con agua, con la consistencia de un lodo, y son bombeadas a través de tuberías hacia el depósito mediante el sistema de relleno hidráulico. Las colas son sedimentos friables, sueltos, de granulometría pequeña y fina, fuertemente limosas, saturadas por las aguas, con alta capacidad de fluidez (Hernández Columbié, T, 2015). Este líquido posee un 30% de sólidos y un 70% de agua, que lleva consigo desechos de productos químicos, los cuales deben ser depositados o manejados de forma correcta con el objetivo de no afectar el medio ambiente.

Actualmente en Cuba, en la provincia de Holguín, el municipio de Moa, cuenta con tres presas de colas, una correspondiente a la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, otra a la empresa Comandante Pedro Soto Alba y una inactiva transformada en pasivo ambiental desde 1970. Las mismas están expuestas a movimientos sísmicos debido a su cercanía a las zonas sísmo generadoras Oriente, Cauto – Nipe, Sabana o Norte Cubana y Norte de la Española.

Entre los años 1995, 1996 y 1998 varios autores hacen referencia a tres sismos registrados en Moa en los años 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, (Hernández Columbié, T, 2015), (Rodríguez Pacheco, R. 2002). Por lo que se hace necesario concentrar los residuos mineros en una ubicación de óptimas condiciones y poder lograr la estabilidad de las presas de cola siendo el objetivo del presente trabajo determinar los factores de seguridad ante acciones dinámicas en taludes de la presa de cola Yagrumaje del municipio de Moa de la provincia de Holguín en condiciones estáticas y dinámicas que asegure la estabilidad de la estructura para los métodos de construcción aguas abajo y línea central.

2. METODOLOGÍA

Con la implementación de los métodos de investigación teóricos como histórico-lógico, análisis y síntesis, hipotético-deductivo y los métodos empíricos la revisión bibliográfica y análisis documental, permitieron dar cumplimiento al problema y los objetivos trazados en la investigación. El estudio de esta problemática se realiza desde las Ciencias Naturales y dentro de ella la rama de la Geología, ya que se enfoca a la Sismología y la Tectónica. El análisis de estabilidad de los taludes de la presa de cola se realizó a través del software Geostudio 2007, pues es considerado por expertos a nivel mundial como software líder para la modelación de los problemas geotécnico con la herramienta SLOPE / W. Para la obtención de los resultados finales se aplicó el análisis de redes de flujo y filtración, el análisis de estabilidad de taludes estático y el análisis de estabilidad dinámico a través del método seudoestático añadiendo una carga sísmica horizontal. El análisis de los factores de seguridad ante acciones estáticas y dinámicas de la presa de cola Yagrumaje permitirá a especialistas y proyectistas de presas de colas realizar diferentes diseños bajo condiciones dinámicas sin necesidad de disponer del software Geoestudio 2007 siempre que no varíen las condiciones del sitio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis seudoestático, permite calcular un factor de seguridad de un dique bajo la influencia de una carga sísmica. Este método utiliza el mismo procedimiento general que cualquiera de los métodos de equilibrio límite convencional, con la diferencia que se incluyen fuerzas seudoestático 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 (Martínez, R, Barrera, S y Gómez, P,

2011). Las magnitudes de las fuerzas pseudoestáticas se indican en las ecuaciones (1 y 2), (Kramer, S. L, 1996) donde a_h y a_v son las aceleraciones horizontales y verticales, k_h y k_v son coeficientes pseudoestáticos horizontales y verticales adimensionales (coeficientes sísmicos), y W es el peso de la masa de falla.

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (1)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (2)$$

Diversos autores plantean que el coeficiente sísmico horizontal se puede determinar reduciendo la aceleración máxima del terreno. Sin embargo, la AASHTO 2012 en el epígrafe 11.6.5.2 y 11.6.5.4, Cálculo del coeficiente de aceleración sísmico para el diseño de muros de contención y presiones respectivamente, plantea que, el coeficiente de aceleración sísmico lateral k_h debe ser determinado considerando el efecto que puede provocar la onda de amplificación del suelo en el muro y la capacidad de desplazarse lateralmente. Plantea además que, si el muro es libre de moverse lateralmente bajo la influencia de una carga sísmica durante el diseño sísmico y permitir una deformación, entonces, el coeficiente sísmico lateral puede ser reducido al 50% la aceleración máxima del suelo, de lo contrario se debe asumir el 100%. Establece que la reducción del k_h , debe ser considerado tanto en la estabilidad de muros como en taludes (AASHTO, 2012)

Para determinar la aceleración máxima del suelo en la zona de estudio se trabajó con la (NC 46: 2014) teniendo en cuenta siguientes aspectos:

Valores de aceleración pico del suelo cuando $T=0$, aceleración espectral horizontal máxima para período cortos y largos.

La zona de emplazamiento del objeto de estudio.

Clasificación del sitio según el tipo de perfil de suelo.

Factores de escala k_d de acuerdo al tipo de sismo.

Aceleración máxima del suelo del sismo de diseño.

Las presas de cola no pueden presentar ningún tipo de fallas en sus taludes ni admitir ciertos desplazamientos o deformaciones, ya que puede poner en riesgo la vida de miles de personas y causar cuantiosos daños al medioambiente, por lo que, ante la acción dinámica, estos deben permanecer estables. Por tanto, el coeficiente sísmico horizontal (k_h) con el que se corrió el programa para obtener el factor de seguridad fue el 100% de la aceleración máxima del suelo según lo establecido por la AASHTO 2012.

Para correr el software se dibujó la sección típica de la presa de cola Yagrumaje para los métodos de construcción aguas abajo y línea central, obteniéndose las figuras 1 y 2.

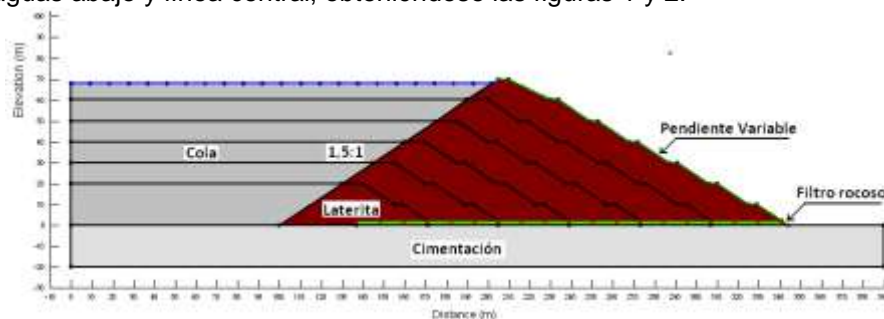


Figura 1. Sección transversal de la presa de cola Yagrumaje con el método de construcción aguas abajo

Fuente: Elaboración propia

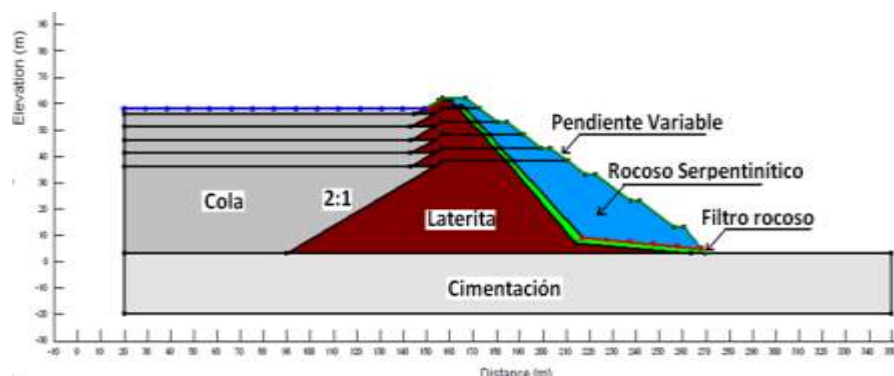


Figura 2. Sección transversal de la presa de cola Yagrumaje con el método de construcción línea central

Fuente: Elaboración propia

Ambas variantes están compuestas por laterita, material que conformará los taludes de la presa. En la base del talud, se encuentra un filtro rocoso que permite evacuar el contenido de agua de las colas saturadas, y la cimentación de la presa es rígida de eluvio de serpentinita color gris verdoso con numerosos fragmentos de roca. Cada variante está compuesta por seis fases.

La diferencia entre las variantes método de aguas abajo con la variante de línea central se encuentra en el método de construcción, además de no contar con el espaldón rocoso. En este caso, la variantes método de aguas abajo está compuesta completamente por laterita recubriendo en cada operación el talud aguas abajo del dique anterior por lo que la cara externa está constantemente cambiando. A continuación, se presentan en las tablas 1, 2 y 3 el resumen de las propiedades físico-mecánicas.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas del rocoso serpentinitico

Propiedades	
Peso específico de los sólidos (γ_s)	2.7
Humedad (W)	4.14 %
Peso específico húmedo (γ_f)	21.2 kN/m ³
Peso específico seco (γ_d)	20 kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	22.9 kN/m ³
Peso específico sumergido (γ')	12.9 kN/m ³
Porosidad (n)	24 %
Saturación (S)	35 %
Resistencia a la compresión axial (R_{cnat})	10.5 MPa
Resistencia a la compresión axial (R_{csat})	5.8 MPa
Coeficiente de ablandamiento (Ca)	0.55
Angulo de fricción interna (ϕ)	36°

Fuente: ENIA, Holguín.

Tabla 2. Propiedades físico-mecánicas de la laterita

Propiedades	
Finos (< Tamiz 200)	42 %
Arena	44 %
Grava	14 %
Límite Líquido (LL)	52 %
Límite Plástico (LP)	34 %
Índice Plástico (IP)	18 %
Peso específico de los sólidos (γ_s)	3.41
Humedad Natural (W)	24.7 %
Peso específico húmedo (γ_f)	22 kN/m ³
Peso específico seco (γ_d)	17.0kN/m ³
Índice de Poros (e)	1.01
Saturación (S)	83 %
Angulo de fricción interna (ϕ)	25°
Cohesión (C)	0.02 MPa
Módulo de deformación (E) *	16 MPa
Coeficiente de Poisson (μ) *	0.30

Fuente: ENIA, Holguín.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de las colas

Propiedades	
Finos (< Tamiz 200)	63 %
Arena	33 %
Grava	4 %
Límite Líquido (LL)	43 %
Límite Plástico (LP)	37 %
Índice Plástico (IP)	6 %
Índice de consistencia (Ic)	0.13 (muy)
Peso específico de los sólidos	3.6
Humedad natural (W)	42.2 %
Peso específico húmedo (γ_f)	20.5 kN/m ³
Peso específico seco (γ_d)	14.3 kN/m ³
Índice de Poros (e)	1.55
Saturación (S)	98 %
Angulo de fricción interna (ϕ)	29°
Cohesión (C)	0.025 MPa
Coeficiente de Poisson (μ) *	0.30

Fuente: ENIA, Holguín.

Para lograr determinar los factores de seguridad en condiciones estáticas y dinámicas de los taludes de la presa estudiada, se realizó inicialmente un análisis de filtración la herramienta *SEEP/W* Análisis (*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*, a través del software Geostudio 2007.

Luego se creó un nuevo modelo especificando el tipo de análisis, en este caso el de equilibrio límite. Se especificó el método por el cual el software realizará el análisis del factor de seguridad estático. En este caso fue analizado por el método Morgenstern-Price, pues tiene en cuenta los momentos y las fuerzas de equilibrio, no siendo así los otros métodos. Se especifica el modelo del material Mohr-Coulomb, y 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. Este trabajo se realizó para cada variación de talud de 1,5:1 hasta 4:1. Como primer resultado se obtuvo el factor de seguridad estático del talud aguas abajo de la presa de cola Yagrumaje para los métodos de construcción aguas abajo y línea central (tabla 4).

Tabla 4. Resultado resumen de factor de seguridad ante condición estática para el método de construcción línea central.

Variación de las relaciones de taludes	Factor de Seguridad Estático	
	Método de construcción aguas abajo	Método de construcción línea central
Talud 1.5:1	1,151	1,407
Talud 2:1	1,404	1,701
Talud 2,5:1	1,657	1,818
Talud 3:1	1,905	1,965
Talud 3,5:1	2,143	2,552
Talud 4:1	2,388	2,75

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 4 para la variante aguas abajo, 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 cola 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, para la relación de talud 1.5:1 el factor de seguridad estático es menor que 1.5 por lo que no cumplen lo establecido por las normas y 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 considerando estática los taludes de la presa a partir de la relación 2:1 hasta 4:1. La aceleración máxima del suelo calculada para la zona de estudio del municipio de Moa de la provincia de Holguín es de 0.22g. Asumiendo que la presa de cola Yagrumaje no puede presentar deformaciones ante eventos sísmicos debido al impacto ambiental y socioeconómico que puede causar el derrame de la cola por lo que se trabajó con el 100 % de la aceleración máxima del sitio para determinar el coeficiente sísmico horizontal de la zona y trabajar del lado de la seguridad. Así también se obtuvieron los factores de seguridad ante acciones dinámicas con la variación de los coeficientes sísmicos horizontales y las relaciones de taludes ya explicadas (tabla 5).

Tabla 5. Factores de seguridad ante acciones dinámicas para el método de construcción aguas abajo.

Coeficientes sísmicos horizontales	Factores de seguridad dinámicos con la variación de las relaciones de taludes			
	2,5:1	3:1	3,5:1	4:1
Kh=0,10	1,249	1,39	1,512	1,625
Kh=0,12	1,188	1,316	1,425	1,525
Kh=0,13	1,16	1,28	1,384	1,479
Kh=0,14	1,132	1,249	1,364	1,436
Kh=0,15	1,106	1,217	1,21	1,395
Kh = 0,2	0,988	1,080	1,162	1,220
h = 0,3	0,806	0,871	0,928	0,974

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Factores de seguridad ante acciones dinámicas para el método de construcción línea central.

Coeficientes sísmicos horizontales	Factores de seguridad dinámicos con la variación de las relaciones de taludes				
	2:1	2,5:1	3:1	3,5:1	4:1
Kh=0,10	1,338	1,478	1,59	1,817	1,84
Kh=0,12	1,279	1,406	1,568	1,717	1,791
Kh=0,13	1,25	1,372	1,54	1,688	1,775
Kh=0,14	1,223	1,34	1,502	1,643	1,728
Kh=0,15	1,197	1,31	1,483	1,601	1,679
Kh = 0,2	1,077	1,174	1,312	1,45	1,59
Kh = 0,3	0,773	0,912	0,991	1,137	1,262

Fuente: Elaboración propia

Las tablas 5 y 6 muestran los resultados de factores de seguridad ante acciones dinámicas para los métodos de construcción seleccionado. En la medida que aumenta el valor del coeficiente sísmico horizontal se produce una disminución del factor de seguridad en cada relación de talud para cada pendiente.

Como se definió anteriormente el valor determinado del coeficiente sísmico horizontal para la zona estudiada es $k_h=0.216$, por tanto, analizando la tabla 5 para el variante método de construcción aguas abajo no se exponen los resultados de las relaciones de taludes 1.5:1 y 2:1 ya que no son estables estáticamente y por tanto para el análisis dinámico tampoco lo son. Sin embargo, 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 este que era de esperar, pues una de las medidas utilizadas para mejorar la estabilidad de taludes, es tender los mismos. Al analizar el coeficiente sísmico horizontal para la zona estudiada $k_h=0.216$, los taludes de esta presa deben tener pendiente de 3.5:1 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 un evento sísmico.

La tabla 6, muestra los resultados de factores de seguridad ante acciones dinámicas para el variante método de construcción línea central. La relación de talud 1.5:1 no cumple con el análisis de estabilidad estática por tanto es la más desfavorable. Por lo que, a partir de la relación de talud 2:1 en adelante los taludes de la presa de cola Yagrumaje comienzan a ser estables ante acciones dinámicas hasta llegar a k_h entre 0.2 y 0.3 donde se hacen inestables ya que son menores que 1. Las relaciones de taludes 2.5:1 y 3:1 son estables hasta k_h 0.2; pero 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.

Las tablas 4, 5 y 6 resultan muy útiles a la hora de definir la pendiente de talud a utilizar para ambos métodos constructivos según varíe el coeficiente sísmico horizontal, permitiendo a los inversionistas definir este parámetro en sus proyectos de cola siempre y cuando no varíen las condiciones bajo las cual fue analizada la presa en estudio.

4. CONCLUSIONES

1. El análisis de estabilidad de taludes de la presa de relave minero Yagrumaje realizado mediante el software Geoestudio 2007 permitió conocer los factores de seguridad estáticos y los dinámicos a través del empleo del método pseudoestático para los métodos de construcción línea central y aguas abajo con la variación de las relaciones de taludes.
2. En el análisis estático, la variante de construcción aguas abajo los taludes de la presa de cola se comportan inestable para las relaciones de taludes 1.5:1 y 2:1, pues los FS estático son menores que 1.5 aumentando progresivamente a medida que se incrementan las relaciones de los taludes

aguas abajo de la presa. En la variante línea central los taludes de la presa se comportan de manera estable a partir de la relación 2:1 en adelante.

3. Los resultados del análisis dinámico arrojaron que en el variante método de construcción aguas abajo, para $k_h=0.216$ las relaciones de taludes que permanecen estables son a partir de 3.5:1 y que para $k_h=0.30$ ninguna relación de talud es estable. La variante línea central a partir de la relación de talud 2.5:1 para $k_h=0.2$ los taludes son estables. Taludes con pendiente 3.5:1 y 4:1 resultan estables para cualquier coeficiente sísmico horizontal en el sistema de línea central, lo cual sugiere que siempre sea este el método constructivo que deba ser utilizado.

5. CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de interés con la investigación presentada.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hernández Columbié, T (2015). *Sistema de gestión de riesgos por fallo en la presa comandante Pedro Soto Alba*. (Tesis doctoral) Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.
- Rodríguez Pacheco, R. (2002). *Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y maganeso en residuos de la zona minera de Moa*. (Cuba) Influencia del comportamiento hidromecánico. Universidad Politécnica de Cataluña.
- SLOPE / W (2007). Slope stability analysis. GeoStudio, GeoSlope International, Canada.
- Martínez, R, Barrera, S y Gómez, P. (2011). El método pseudoestático de estabilidad en presas: un análisis crítico, *Revista Obras y Proyectos No.9*, 30-37, Chile.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall.
- AASHTO (2012). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- NC 46 (2014). Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción.

SOBRE LOS AUTORES

Yanet Vázquez Ballester. Ingeniero Civil. Master en Ciencias. Profesora Asistente del Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín, Sede Oscar Lucero Moya, Cuba. yvazquezb@uho.edu.cu

Eduardo Beira Fontaine. Ingeniero Civil. Doctor en Ciencias. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente. Profesor Principal de Geotecnia. Miembro de la Sociedad de Ingeniería Civil de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba, UNAICC. Miembro de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelo. efontain@uo.edu.cu