

# Caracterización de suelo diatomaceo y respuesta a consolidación unidimensional

*/Diatomaceous soil characterization and unidimensional consolidation response*

Daniel Alberto Zuluaga Astudillo<sup>1</sup>, Carlos José Slebi Acevedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Magister en Ingeniería Civil, Docente Investigador Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá Colombia, jwinnorth@gmail.com

<sup>2</sup> Especialista en Interventoría de Obras Civiles, Estudiante Maestría Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, carlosslebi@hotmail.com

FECHA DE RECEPCIÓN DEL ARTÍCULO: 26/05/2016 FECHA DE ACEPTACIÓN DE ARTÍCULO: 01/09/2016

## RESUMEN

El presente artículo refleja en la primera parte una aproximación al estado del arte respecto de la presencia de diatomeas en depósitos de suelo y se proponen la elaboración de suelos en laboratorio a diferentes dosificaciones Caolín – diatomeas. Este artículo se motiva en la ausencia de estudios de diatomeas respecto de usos en Ingeniería Civil.

En la segunda parte una vez identificada una fuente de explotación de suelo diatomaceo, se desarrollan ensayos de caracterización, en particular los referentes a contenidos de humedad (límites de atterberg) y cambios de plasticidad para diferentes dosificaciones. Se valida el contenido mínimo diatomeas y la especie representativa mediante pruebas con microscopio electrónico. Finalmente se evalúa el comportamiento ante el ensayo de consolidación unidimensional y se reportan los coeficientes de compresibilidad respectivos.

## PALABRAS CLAVE

Diatomeas, consolidación unidimensional, microscopía, límites de atterberg.

## ABSTRACT

This article reflects a review of the state of the art regarding the presence of diatoms in soil deposits and propose preparation of soil in laboratory at different dosages Kaolin - Diatoms. This article is motivated by the lack of studies of Diatoms respect to civil engineering uses.

Once identified an exploration source of diatomaceous soil, characterization tests, particularly concerning Moisture content (Atterberg limits) and changes of plasticity are developed at different dosages. The minimum Diatoms content and representative species by electron microscopic evidence is validated.

Finally, the behavior is evaluated according to the Unidimensional Consolidation test and respective compressibility coefficients are reported.

## KEY WORDS

Diatom, unidimensional consolidation, microscopy, atterberg limits.

## INTRODUCCIÓN

Existe una tendencia por el estudio del comportamiento de suelos que presentan rastros de microfósiles de algas unicelulares sedimentadas [1], denominadas Diatomeas, teniendo en cuenta su presencia en depósitos naturales alrededor del mundo (ej: Cassarina en Africa [2], Lago Myvatn en Islandia [3], Quebec Candá [4], entre otros).

Según [5] el comportamiento de suelos que contienen Diatomeas se destacan por tener propiedades físicas y mecánicas particulares, que difieren de los estándares generalmente aplicables y aceptados para la mayoría de los suelos, en razón de sus características micro y nanoestructurales que pueden afectar las propiedades de los depósitos.

Vale la pena resaltar que los pocos estudios adelantados en ingeniería civil conllevan a concluir que la interacción entre las Diatomeas y partículas de suelo (arcilloso u orgánico) no está plenamente caracterizada [5], ni mucho menos la influencia del comportamiento del suelo en función del contenido de las Diatomeas (para cualquier tipo de especie), ni tampoco las alteraciones por presencia de agua o la variación volumétrica ante un estado de esfuerzos específico, por ende se requiere de bastante investigación adicional.

A partir de lo anterior se puede deducir que el uso en obras de ingeniería resulta ser casi nulo, precisamente por la falta de conocimiento o

patrones de referencia en términos de resistencia, plasticidad o variación volumétrica de los depósitos, siendo esto precisamente el aliciente para desarrollar diversas investigaciones en pro de definir las propiedades mecánicas de suelos diatomáceos haciendo uso de ensayos de laboratorio.

Es importante conocer sobre los amplios usos que presentan las Diatomeas en agricultura y control de plagas [6] e incluso el interés que presentan estos depósitos en la industria petrolera[7], a partir de lo cual se idealiza la posibilidad de generar aplicaciones en obras de Ingeniería Civil.

**Definición**

Resulta importante comprender las características morfológicas y de especie de las diatomeas para poder enmarcar el comportamiento de los depósitos en los cuales se encuentran.

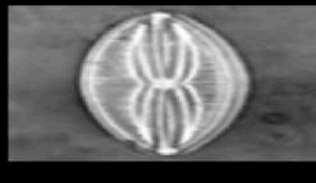
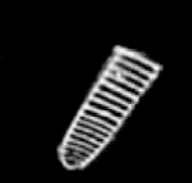


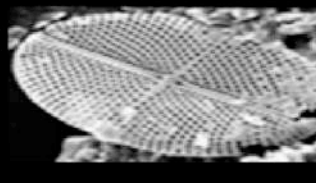
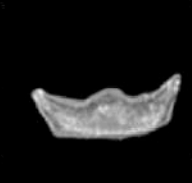
Las diatomeas son algas fotosintéticas con un esqueleto de silíceo denominado frústula y son encontradas en casi todos los ambientes acuáticos incluyendo agua dulce, salada, suelos, de hecho en cualquier entorno húmedo. Presentan tamaños entre 20 y 200 micras de diámetro o longitud, dependiendo de la especie. Algunos casos

excepcionales alcanzan los 2 milímetros. Pueden presentarse de manera solitaria o en colonias, unidas por filamentos o formando cadenas [1]. Otras fuentes las definen como depósitos de algas fosilizadas, que se han sedimentado en mares y lagos (en períodos cercanos a los 40 millones de años) y en la actualidad son explotadas ya sea en minas o a cielo abierto. Pueden presentarse se manera entera o como restos de algas unicelulares opalizadas, en matrices de arcilla, materia orgánica, limonita y cuarzo cristalino [6].

A la fecha se han reconocido más de 200 especies de diatomeas, y se especula que alrededor de 100.000 Especies se han extinguido. Algunas investigaciones indican que la concentración de sílice, está influenciada por el género y la especie, y no tanto por factores ambientales [6].

En términos de ingeniería civil, la diatomita o tierra de diatomeas se describe como una roca sedimentaria, con porosidad considerable (alta capacidad de absorción y área superficial) y un bajo peso volumétrico cuyo origen es la acumulación y posterior compactación de las frústulas. La composición de este tipo de roca es alrededor de 90% de sílice y el restante se divide entre óxidos de hierro y aluminio, por lo anterior se considera una roca inerte [8].

Tabla 1. Identificación morfológica y dimensional de algunos tipos de Diatomeas.

IMAGEN CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO	ESPECIE/LUGAR/TAMAÑO	IMAGEN CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO	ESPECIE/LUGAR/TAMAÑO
	Lyrella lyra (Ehrenberg)		Fragilariopsis ritscheri Hustedt
	East Winch Borehole, Nar Valley, Norfolk, UK		Louisville Moat, S.W. Pacific
	80 x 30 microns		8 microns transapical axis (broken specimen)
	Dimeregramma sp.		Stephanopyxis turris (Greville and Arnott) Ralfs
	East Winch Borehole, Nar Valley, Norfolk, UK		Walvis Ridge, S.E. Atlantic
	50 microns		23 microns (high focus)
	Cocconeis molesta var. crucifera Grunow		Eucampia antarctica (Castracane) Mangin 1915 (girdle veiw)
	East Winch Borehole, Nar Valley, Norfolk, UK		Walvis Ridge, S.E. Atlantic
	30 x 15 microns (SEM)		26 microns (horn to horn)

A continuación se presentan una serie de registros fotográficos de diferentes tipos de diatomeas, de acuerdo a morfotipos y descripción dimensional dada por el University College of London [1].

### Avances en ingeniería civil

Tal como se mencionó inicialmente, la investigación del comportamiento de las diatomeas en el área de la ingeniería civil no se encuentra muy avanzada y a la fecha se han desarrollado algunas investigaciones que pretenden evaluar la respuesta mecánica y el cambio del comportamiento bajo diferentes condiciones de humedad.

Así por ejemplo, la referencia [5] desarrolló una investigación sobre la resistencia al corte en mezclas artificiales de diatomita (d) - caolinita (k) utilizando el equipo de corte directo simple, en condiciones no drenadas. Lo anterior con el fin de conocer la influencia del contenido de diatomita en las propiedades de resistencia de dichas mezclas.

Dicha fuente elaboró cinco dosificaciones: (0% d - 100% k), (20% d - 80% k), (40% d - 60% k), (60% d - 40% k) y (100% d - 0% k), todas las mezclas se prepararon en proporciones de peso seco. La diatomita y la caolinita que se usaron en esta investigación son materiales comercialmente disponibles en México.

Según [5], el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación dependen de la dosificación de diatomeas. Con base en los resultados de

esta investigación se explican algunas de las propiedades en el suelo volcánico lacustre de la ciudad de México. Las trayectorias de esfuerzo para los ensayos en corte simple se presentan a continuación.

Es destacable la relación entre el ángulo de fricción interna,  $\phi'$  y el contenido de diatomita para ambas condiciones de relación de sobre consolidación. Los aumentos de  $\phi'$  para un incremento en el contenido de diatomita menor al 20% son pequeños, (2.3%;  $Ocr = 1$  y 2% para  $Ocr = 2$ ); sin embargo, para contenidos de diatomita superiores (40% y 60%), el incremento es considerable (25.3% y 41%, respectivamente) para  $Ocr = 1$  y (33% y 45%, respectivamente) para  $Ocr = 2$  [5].

Por otra parte [9], ha investigado un tipo de arcilla diatomácea de la formación mangbang del pleistoceno, que ha sido encontrada en los proyectos viales en la región tengchong de la provincia yunnan al sur oeste de China. Esta ha sido caracterizada por diversos métodos, como análisis granulométricos, análisis químicos, difracción de rayos x y análisis por microscopio electrónico, ensayos de contracción y corte, compresión uniaxial e inconfiada, triaxial y corte directo.

Estos resultados revelan que la arcilla diatomácea de tengchong es un suelo o roca inusual la cual tiene características de ambos tipos, suelo arcilloso expansivo ó roca arcillosa suave.

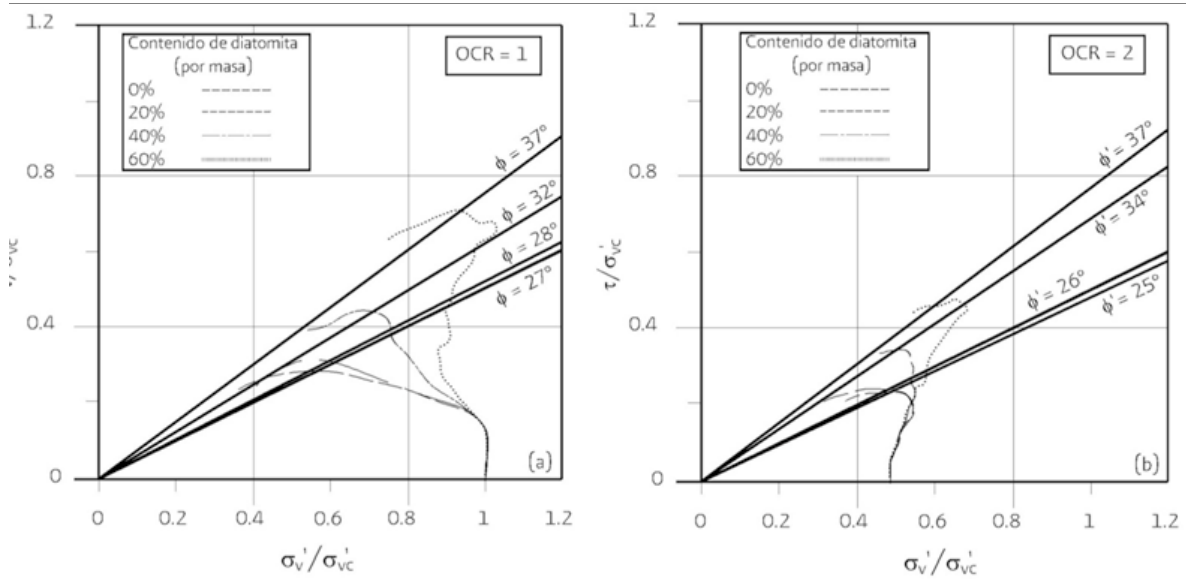


Figura 1. Trayectoria de Esfuerzos no Drenados para OCR=1 y OCR=2 [5].

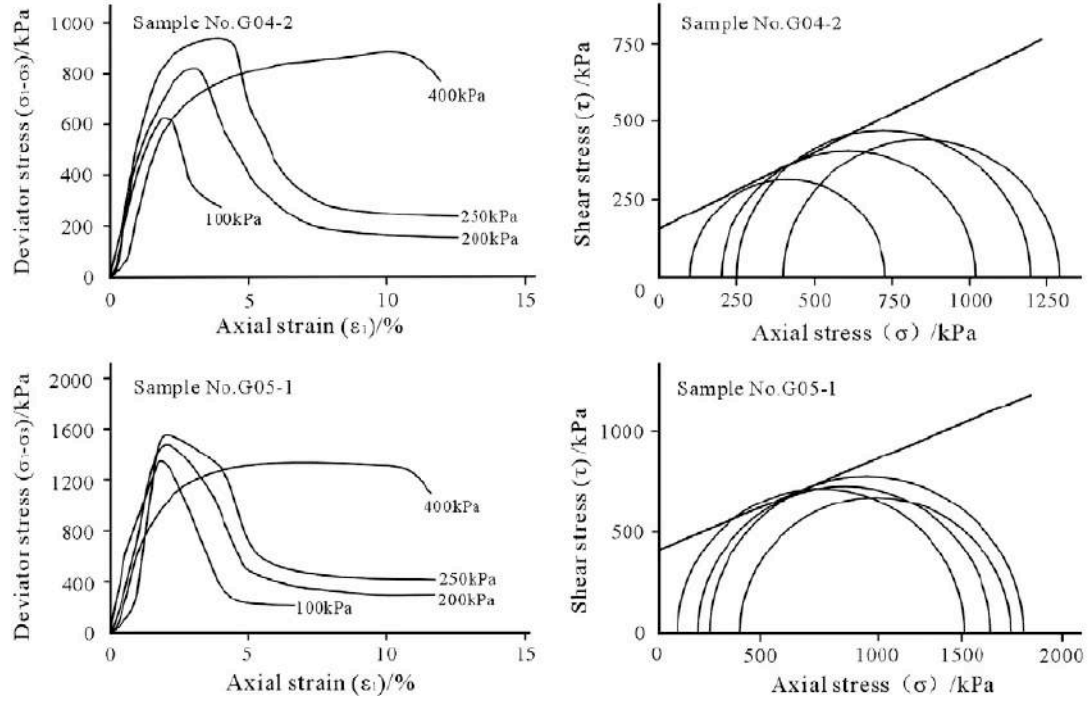


Figura 2. Curvas Ensayos Triaxiales CD, Tierra Diatomacea Arcillosa de Tengchong [9].

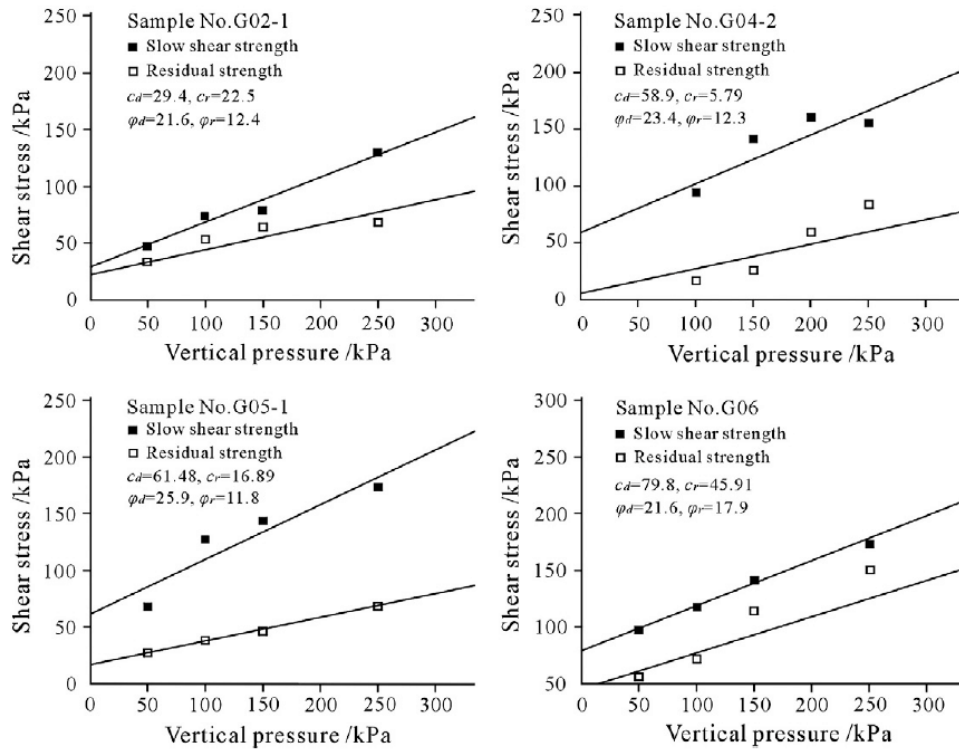


Figura 3. Envolturas de resistencia, Ensayo de corte, Tierra Diatomacea Arcillosa de Tengchong [9]

La referencia [9][10] deduce que las diatomeas al interior del suelo mejoran la conexión entre microestructuras y a su vez las propiedades mecánicas de la tierra diatomacea. Debido a la cantidad significativa de materiales expansivos, la tierra diatomácea de tengchong se define como una roca suave expansiva y es propensa a problemas de ingeniería y riesgos geológicos.

Complementario a lo enunciado, [11] revela que suelos naturales que contienen diatomeas tienden a presentar alta compresibilidad, baja resistencia al corte y dificultad de compactación, por efecto de la alta absorción de agua, límite líquido y ángulo de fricción.

En este estudio se investiga la influencia de suelo diatomaceo en la fábrica y la estabilidad química de suelo resultante, las características de los cambios en la retención de agua, y la disolución de sílice en mezclas de suelo diatomaceo y caolín [11].

Algunas de las principales conclusiones a las cuales se llega en esta investigación son:

1. Disminuye la tendencia de la mezcla mineral a coagular en presencia de sal.
2. Incrementa significativamente los límites líquido y plástico de la mezcla mineral.
3. Incrementa la capacidad de retención de agua de la mezcla mineral.
4. Reduce la solubilidad de la mezclas de caolín, aún en soluciones electrolíticas.

Características que según [11], tienen un impacto grande en el comportamiento general de las mezclas de suelos por la reducción de la influencia de la concentración de los fluidos porales ionicos y por la creación de esqueletos más rígidos que reducen la tendencia a la deformación de los suelos debido a cambios osmóticos y de succión matricial, pero sobre todo se destaca que “la presencia de diatomeas (esqueleto microscópico de algas y plancton muerto), en suelos y sedimentos conlleva a una medición de características mecánicas que contradicen los comportamientos definidos en la geotecnia clásica.

### Teoría que soporta el comportamiento

Si bien, es grande la brecha en el estado de conocimiento respecto del efecto de las diatomes

en depósitos de suelos, algunas teorías que tratan de explicar fenómenos como el aumento en el ángulo de fricción interna se han desarrollado.

Un aporte relevante de [10], respecto de los materiales orgánicos es la identificación de una contribución en el incremento de los límites de atterberg y de la compresibilidad, y a su vez en permitir la generación de altas presiones de poros y bajas presiones de confinamiento efectivo durante el corte. Algunas de las conclusiones principales del estudio son:

1. Todos los suelos orgánicos utilizados en la investigación presentan valores de  $f_i'$  extremadamente altos en las pruebas cu de triaxial.
2. Los mecanismos de deformación de los elementos micro-estructurales explican el comportamiento inusual de estos suelos.
3. Se presentan laminas sub-horizontales densas las cuales son bastante angulares en los limos, las cuales se cree generan trabazón durante la deformación y contribuyen a la alta resistencia de este tipo de suelo.

La teoría del fenómeno expuesta en esta investigación plantea la incidencia de láminas subhorizontales y de otros elementos micro-estructurales no orgánicos (esqueletos de microfósiles) en los altos valores de ángulos de fricción.

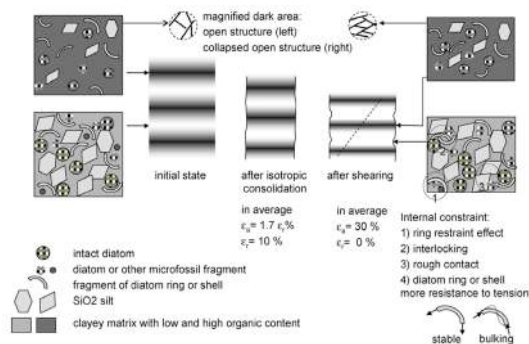


Figura 4. Diagrama Esquemático de mecanismos de micro deformación. [10]

Es así como [10] explica los resultados sobre suelos orgánicos Holandeses que han reflejado en algunos experimentos, parámetros de fuerza efectiva extremadamente altos cuando hay presencia de Diatomeas. Debe tenerse en cuenta que estos valores no son los típicamente esperados y que el

fenómeno no ha sido explicado en su totalidad, sin embargo, aun cuando los valores obtenidos son altos, estos no son utilizados en la práctica.

### Aproximación estado del arte

Respecto del estado del arte, un aporte representativo por parte de la referencia [9] citando a otros autores, se resumen en lo siguiente:

1. Harben expresa que los depósitos de tierra Diatomacea están ubicados en depósitos marinos y lacustres de las eras del Mioceno y Plioceno a lo largo del mundo.

2. Para Day, algunos estudio realizado en Sudafrica muestra un alto contenido de Agua y baja Densidad seca.

3. Tateishi presenta Estudios realizados en Japón que indican que suelos con presencia de Diatomeas no solo tienen alto contenido de agua sino que también alta resistencia y módulo elástico

4. Citando a Tanaka, Shiwakoti, Locat, Palomino y Rajasekaran, [9] expone que muchas investigaciones sugieren que la presencia de Diatomeas incrementan el límite plástico y límite plástico en suelos sedimentarios, el índice de plasticidad, la resistencia al corte y el ángulo de fricción interna, la compresibilidad, y la conductividad Hidráulica y disminuye el límite de contracción (Tanaka y Locat 1999) (Shiwakoti 2002)(Palomino 2011) (Rajasekaran 2006).

5. Hu y Wen, avanzaron en otros estudio sobre suelo diatomaceo (contenido 75%) de la provincia

Tabla 2. Resumen Estado del Arte [10].

TIPO DE SUELO	$\Phi'$	C.M.O	ESF. PPAL	REGIÓN	AUTOR	OBSERVACIÓN
Arcilla Ligerament e Orgánica "Bothkennar Clay"	34°	2% - 4%	25 kPa - 150 kPa	Inglaterra	Hight et al. - 1992	Se planteó que la fracción dominante de limo angular fuera la responsable del alto ángulo de fricción y que el contenido orgánico (2% - 4%) fuese la razón del incremento de los límites de Atterberg.
Arcilla "Bahía de Osaka"	25° - 40°	2% - 4%		Japón	Tanaka y Locat - 1999	Arcilla reconstituida
Relleno Diatomaceo	44°		100 kPa - 300kPa		Day - 1995	Microfósiles identificados como Diatomeas fueron relacionados con los altos ángulos de fricción y los altos límites de Atterberg. El contenido orgánico 2% - 4% no fue considerado. Muestra Diatomacea con bajos valores de densidad seca y alta humedad. Las razones para este alto ángulo de fricción se soportaron en la trabazón y superficie rugosa propias de las Diatomeas a bajos niveles de esfuerzo.
Arcilla Orgánica	57°	10% - 60%	50 kPa - 300kPa	Juturnaiba - Brazil	Coutinho y Lacerda - 1989	Incremento de $F_i' = 23^\circ + 0.5766 OC$
Arcilla "Clayey Gytija"	60° - 90°	10%	15 kPa - 100kPa	Suecia	Larsson - 1990	Abundancia de micro fibras orgánicas y de naturaleza no definida
Arcilla orgánica	28° - 34°	25%	30 kPa - 70kPa	Cubzac Les Points - Francia	Shahanguia n - 1981	Densidad Bulk 12 - 16 kN/m <sup>3</sup> , Valores no muy altos de $F_i'$
Arcilla orgánica	44° - 74°	30%	> 50 kPa	Schwerin, Berlín, Rotterdam - Alemania	Krieg - 2000	Densidad Bulk 1.2 - 1.5 t/m <sup>3</sup> , se plantea la acción de Diatomeas y restos de fibras de plantas en el alto valor de $F_i'$

C.M.O.: Contenido Materia Orgánica.

de LInqu de Shangdong en china que revelaron la resistencia de diferentes criterios bajo condiciones de inundación, sin embargo, cuando los suelos tienen alto contenido de material expansivo arcilloso, el comportamiento mecánico de la tierra diatomácea se ve afectado por este último.

A manera de resumen de algunos ensayos realizados en diferentes lugares del mundo, en suelos con presencia de diatomeas, [10] elabora la siguiente tabla: (ver pagina 43)

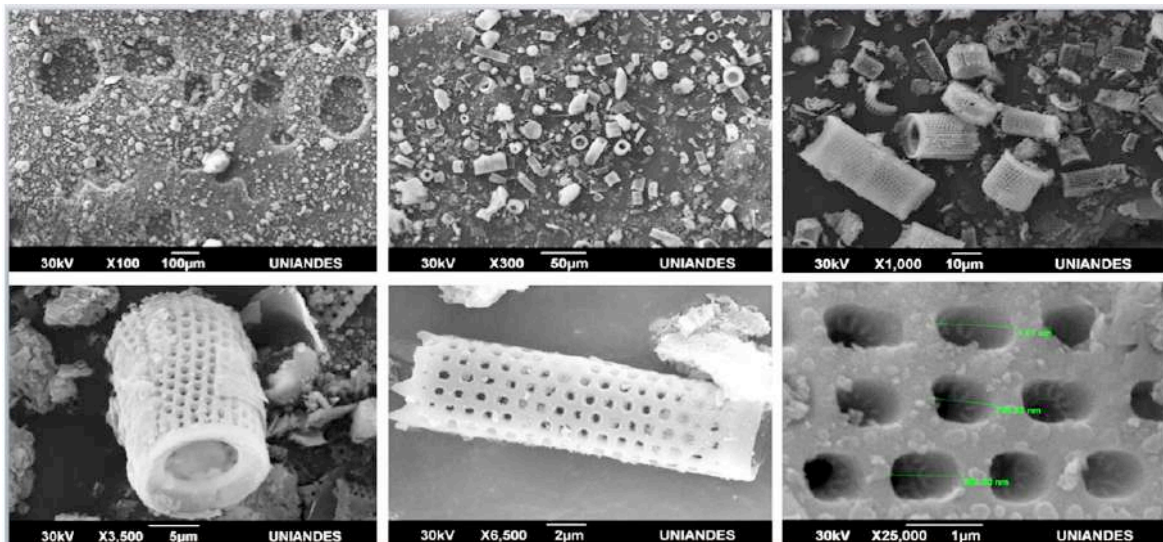


**Figura 5.** Etapas del proceso: Arriba Izquierda: Elaboración suelo al 1.5 LL, Arriba derecha Dsposición suelo en Acrílicos perforados, Abajo Izquierda: Proceso de carga, Abajo derecha: Eliminación de Agua. Fuente: Autores

## MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Como reporte del desarrollo de esta investigación, de la cual se debe mencionar que se desarrolla actualmente en la universidad de los andes bajo la dirección del ingeniero bernardo caicedo hormaza ph. D., Se aclara que los avances aquí presentados son de carácter parcial , y que se ha ejecutado bajo el siguiente plan de ensayos:

1. Microscopía electrónica, con recubrimiento en oro.
2. Estudio de composición química, con recubrimiento en oro.
3. Análisis granulométrico de suelos por tamizado: granulometría combinada por tamizado e hidrometría, de acuerdo a procedimiento descrito en inv-e 123/13.
4. Determinación del peso específico de los suelos y del llenante mineral – método del picnómetro, de acuerdo a procedimiento descrito en inv-e 128/13.
5. Determinación del límite líquido de suelos, procedimiento descrito en inv-e 125/13.
6. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos, procedimiento descrito en inv-e 126/13.
- 7.Consolidación unidimensional de los suelos, procedimiento descrito en norma astm d-2435.



**Figura 6.** Vista en Microscopio Electrónico de suelo con presencia de Diatomeas. Fuente: Autores .

Los ensayos se desarrollaron en mezclas artificiales de suelo caolín – diatomea elaboradas al 1,5 límite líquido. Se resalta que la variable de estudio para esta investigación es la dosificación en peso c%-d% en las siguientes proporciones: diatomea 0% \_ caolín 100%, diatomea 20% \_ caolín 80%, diatomea 40% \_ caolín 60%, diatomea 60% \_ caolín 40%, diatomea 80% \_ caolín 20%, diatomea 100% \_ caolín 0%.

Para el caso de las muestras que se evaluaron en el ensayo de consolidación unidimensional, se fijó un esfuerzo de preconsolidación 30 kpa para todas las dosificaciones ensayadas. Se dispusieron de envases de acrílico perforados lateralmente con filtros superiores e inferiores que permitieran la evacuación del agua de forma homogénea.

Para el ensayo de consolidación se desarrollaron procesos de carga y descarga entre 0,125 y 8 kg/cm<sup>2</sup>. Se implementó el método corto y se evaluó el 100 % de la consolidación primaria con el método de Taylor.

### Resultados

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en los diferentes procedimientos de ensayo.

#### Microscopía electrónica

La microscopía se desarrolló bajo la técnica de barrido electrónico, en una muestra seca, suelta e inalterada en términos de esfuerzos. Dicho ensayo se ejecutó en los laboratorios de la vicerrectoría de investigación de la universidad de los andes. El estudio se realizó a diferentes acercamientos a fin de verificar criterios como: tamaño típico de las partículas y contenido efectivo de diatomeas en el suelo estudiado.

Como se observa en las diferentes escalas de tamaño de las imágenes, las diatomeas se pueden clasificar como limos. La especie identificada en este caso es la “*Auloseira granulata*”. Se destaca el estado de conservación de las diatomeas, aun cuando han sido objeto de procesos de explotación, almacenamiento y transporte, así como el estado de limpieza de los poros. La pureza de este depósito se evidencia en el alto contenido de diatomeas, respecto de la matriz arcillosa que las contiene (15% asegurado por el proveedor [6]), la cual se presenta a continuación:

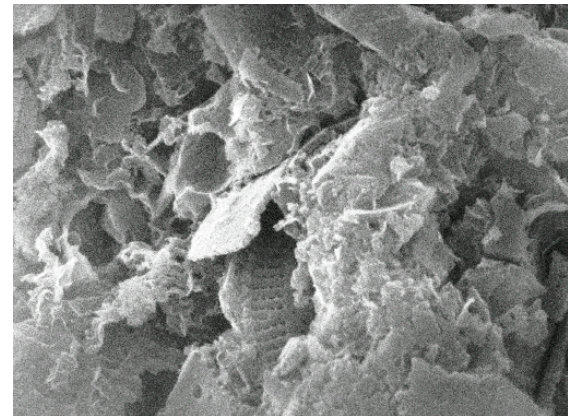


Figura 7. Vista en Microscopio electrónico de matriz arcillosa de suelo con presencia de Diatomeas.

Se plantea que la matriz arcillosa es illita con algunas incrustaciones de caolín, teniendo en cuenta la forma de las láminas, su disposición, la orientación, la micro estructura y la forma de los poros. La figura 7 presenta una escala horizontal de 12 μm.

#### Estudio de composición química

Con el ánimo de caracterizar de manera más precisa el material de estudio, tanto la arcilla como las diatomeas, se hizo el análisis de composición química, obteniendo el siguiente reporte :

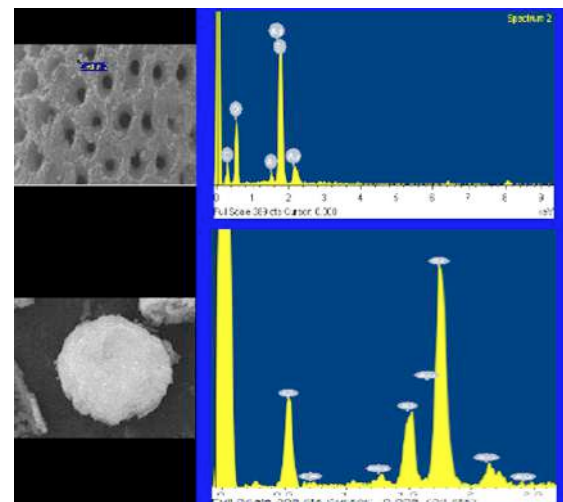


Figura 8. Reporte de Composición Química. Arriba: Diatomeas Escala Horizontal 8μm. Abajo: Arcilla Escala 30μm.

De los reportes se observan los picos de sílice, oxígeno y aluminio, lo cual concuerda con la bibliografía existente para arcilla y con la

descripción técnica del proveedor respecto de las Diatomeas.

*Determinación de la Gravedad específico de los suelos – Método del picnómetro*

Para las Diatomeas, se obtuvo un valor de gravedad específica de 2.55 y para el Caolín se obtuvo un valor de Gs de 2.65. Los valores obtenidos tanto para las Diatomeas como para el Caolín, se encuentran dentro de los rangos de valores típicos para este tipo de suelos. Se toma como referencia un listado de valores típico tomados de [12], para validar la normalidad en orden de magnitud del resultado de los ensayos.

*Determinación del límite líquido (LL) y Plástico (LP)*

Respecto de estos ensayos se puede evidenciar con claridad que tanto el límite líquido, como el límite plástico se aumentan a medida que el contenido de Diatomeas crece. Para el caso del límite líquido se observa un cambio de pendiente cuando hay una concentración de 40% de diatomeas. Por encima de este nivel, la tasa de aumento del LL, aumenta mucho más que entre 0% y 20%. Por otra parte el comportamiento del límite plástico es más regular al conservar la misma pendiente en función del

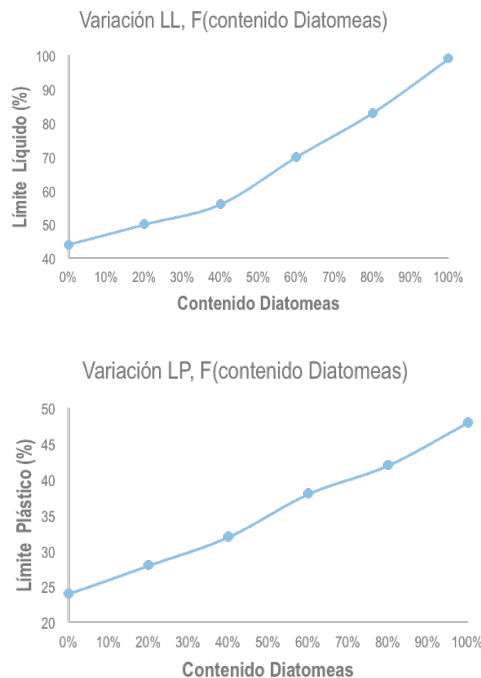


Figura 9. Variación Límites de Atterberg en función del Contenido de Diatomeas

contenido de diatomeas. Tal comportamiento se presenta a continuación.

**Índice de plasticidad**

Vale la pena resaltar que si bien los LL y LP aumentan con el contenido de diatomeas, resulta importante considerar el aumento en el índice de plasticidad ya que como se observó, las pendiente entre LL y LP pueden ser diferentes. Para este caso se obtuvo que el índice de plasticidad aumenta, con el contenido de diatomeas, pero diversifica su comportamiento en el 40% de concentración, punto en el cual se evidenció cambio de pendiente, es decir, que se refleja la incidencia del límite líquido. Se validaron los ordenes de magnitud de los valores obtenidos consultando la fuente [13].

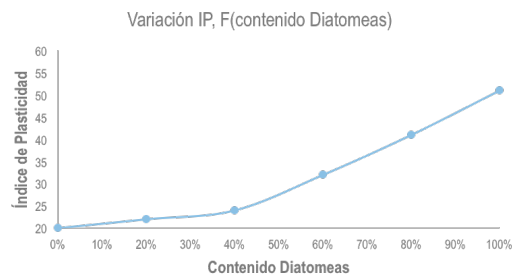


Figura 10. Variación Índice de plasticidad en función del Contenido de Diatomeas

De acuerdo a la clasificación para plasticidad propuesta por [14] se puede deducir que la plasticidad con presencia de diatomeas tienen a ascender en función del aumento de la concentración, clasificándola como “media” en dosificaciones hasta del 50%, y “alta” para concentraciones superiores a dicho porcentaje.

**Nivel de Actividad**

Adicionalmente se calculó el nivel de actividad para el Caolín obteniéndose un valor de 0,404 y para las Diatomeas de 0,998. Según [5] la actividad muestra un aparente incremento con el aumento del contenido de diatomeas. Algunos suelos diatomáceos naturales, también presentan valores altos de actividad, a pesar de que la fracción arcillosa no es alta.

Shiwakoti citado por [5] sugiere que las partículas de Diatomeas no se comportan como partículas inertes; por el contrario, se comportan como partículas activas, como lo hacen los minerales

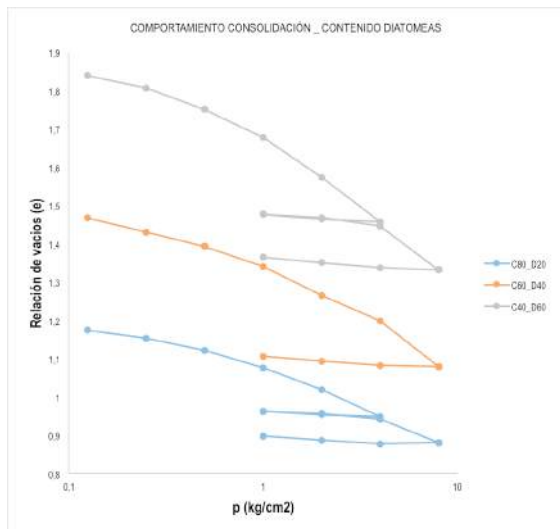
de arcilla. Lo anterior puede indicar que la actividad no es un buen parámetro para evaluar la contribución de pequeñas partículas porosas que no son minerales de arcilla.

**Tabla 3.** Valores de Referencia para Actividad en Suelos. [14].

ACTIVIDAD	CLASIFICACION	TIPO DE ARCILLA	POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN
$A < 0,75$	Inactivas	Caolinitas	BAJO
$0,75 < A < 1,25$	Normales	Ilita	MEDIO
$A > 1,25$	Activas	Montmorillonita ( $A > 7,0$ )	ALTO

### Consolidación unidimensional de los suelos

Teniendo en cuenta la evidencia obtenida en la microscopía, respecto de altos contenidos de microporos, así como la elevada presencia de Diatomeas en la matriz arcillosa, resultó inquietante evaluar el proceso para la disipación de presión poros y la variación volumétrica que presentarían las muestras ante un ensayo de carga unidimensional. Respecto del comportamiento ante la consolidación edométrica se repotan los siguientes gráficos en términos de las curva esfuerzo ( $\log$ ) Vs. relación de vacíos, para diferentes dosificaciones de Diatomeas.



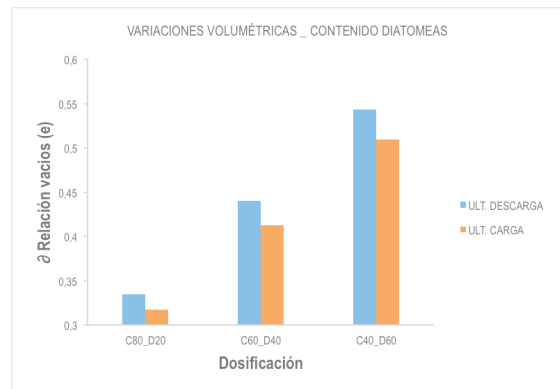
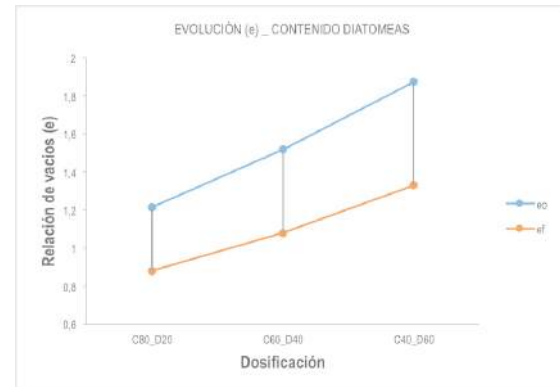
**Figura 11.** Curvas de Consolidación para diferentes concentraciones de Diatomeas.

De lo anterior se observa que a medida que el contenido de Diatomeas aumenta entre el 20% y 60%, el orden de magnitud de la relación de vacíos lo hace también, complementario al comportamiento del coeficiente de compresibilidad, el cual también incrementa su magnitud a medida que la muestra presenta mayores dosificaciones de Diatomeas.

DOSIFICACIÓN	$\Delta e$	$\Delta p$	$C_e$
C80_D20	0,24	1,2	0,2
C60_D40	0,31	1,2	0,26
C40_D60	0,42	1,2	0,35

**Tabla 4.** Variaciones del Coeficiente de Compresibilidad en función del Contenido de Diatomeas.

El comportamiento de las relaciones de vacíos inicial ( $e_0$ ) y final ( $e_f$ ), para las diferentes dosificaciones, se presentan las siguientes gráficas:



**Figura 12.** Izquierda: Evolución de la Relación de Vacíos ( $e$ ) para diferentes contenidos de Diatomeas, Derecha: Variaciones volumétricas para diferentes contenidos de Diatomeas

De las gráficas anteriores se observa que para un mayor contenido de Diatomeas, los deltas de relación de vacíos ( $\Delta e = e_0 - e_f$ ) se incrementan también. Dicha variación se debe mayoritariamente al aumento de la pendiente de la relación de vacíos se encuentran a lo largo fue de aseverar que incluir que las Diatomeas restringer el rebote de los suelos ante la eliminación de vacíos inicial.

Ya que los procesos de consolidación se hicieron con ciclos de carga y descarga, se quiso evaluar el efecto de la relación de vacíos en el punto final de cada etapa. Es claro que la relación de vacíos en

el último punto de la descarga es mayor que en el último punto de la carga, lo que implica que el suelo tiende a recuperar algo de la deformación inducida unidimensionalmente. Las variaciones son del orden de 0.01e y 0.02e, las cuales son pequeñas en comparación a suelos blandos típicos. Dicho fenómeno se puede validar con la figura 11, en la cual se observa que las curvas de recompresión resultan ser casi horizontales a lo largo de las diferentes cargas, lo que conlleva a concluir que las Diatomeas restringen el rebote de los suelos ante la eliminación de los esfuerzos actuantes sobre ellos.

## CONCLUSIONES

En consideración de las fuentes consultadas se puede aseverar que hay una tendencia por el estudio del comportamiento de suelos que presentan rastros de diatomeas, tendencia de carácter global ya que este tipo de fósiles se encuentran en depósitos de todas las latitudes del mundo.

Vale resaltar que los antecedentes y algunos de los resultados obtenidos, como el de la consolidación unidimensional, establecen que el comportamiento de suelos que contienen diatomeas presentan propiedades físicas y mecánicas irregulares, respecto de lo aceptados para la mayoría de los suelos, y la única explicación se da por efecto de sus características a nivel micro y nano.

La interacción entre las diatomeas y partículas de suelo no está plenamente caracterizada, y de igual forma falta estudio en la influencia del comportamiento del suelo en función del contenido de las diatomeas (para cualquier tipo de especie), en las alteraciones por presencia de agua o en la variación volumétrica ante un estado de esfuerzos específico. Esta última condición abordada con el presente estudio.

Algunas de las teorías plantean que la presencia de láminas subhorizontales y de otros elementos micro-estructurales no orgánicos (esqueletos de microfósiles, diatomeas en este caso) generan altos valores de ángulos de fricción.

En este estudio se validó que las diatomeas se pueden clasificar como limos. De acuerdo a los resultados de microscopía se destaca el buen estado de conservación de las diatomeas, aun cuando han sido objeto de procesos de explotación, almacenamiento y transporte, así como el estado

de limpieza de los poros.

Se pueden aseverar que los principales componentes de la arcilla y de las diatomeas son: sílice, oxígeno y aluminio, lo cual concuerda con la bibliografía referente a la arcilla y con la descripción técnica del proveedor de diatomeas.

Los valores de gravedad específica obtenidos tanto para las diatomeas como para el caolín, se encuentran dentro de los rangos de valores típicos.

Respecto de límites de atterberg se puede evidenciar con claridad que tanto el límite líquido, como el límite plástico se aumentan a medida que el contenido de diatomeas crece.

El comportamiento del límite plástico es regular al conservar la misma pendiente para cualquier contenido de diatomeas. El índice de plasticidad aumenta, con el contenido de diatomeas, pero diversifica su comportamiento en el 40% de concentración, punto en el cual se evidenció cambio de pendiente, es decir, que se refleja la incidencia del límite líquido.

Se puede deducir que la plasticidad asciende, a medida que aumenta la dosificación de diatomeas, clasificándola como “media” en dosificaciones hasta el 50%, y “alta” para concentraciones superiores.

A medida que el contenido de diatomeas aumenta entre el 20% y 60%, el orden de magnitud de la relación de vacíos lo hace también, complementario al comportamiento del coeficiente de compresibilidad, el cual también incrementa su magnitud a medida que la muestra presenta mayores dosificaciones.

Para un mayor contenido de Diatomeas, los deltas de relación de vacíos ( $\Delta e = e_0 - e_p$ ) se incrementan también. Las variaciones de relación de vacíos entre la última etapa de carga y la última descarga del ensayo de consolidación, son del orden de 0.01e y 0.02e, las cuales son pequeñas en comparación a suelos blandos típicos. Dicho fenómeno se puede validar con la figura 11, en la cual se observa que las curvas de recompresión resultan ser casi horizontales a lo largo de las diferentes cargas, lo que conlleva a concluir que las Diatomeas restringen el rebote de los suelos ante la eliminación de los esfuerzos actuantes sobre ellos.

## REFERENCIAS

- [1] M. Olney, University College of London. (2002). microfossil image recovery and circulation for learning and Education. *Miracle* – JISC [Online]. Disponible en: <http://www.ucl.ac.uk/GeolSci/micropal/welcome.html>
- [2] R.J. Flower. “Recent environmental change in North African wetland lakes: diatom and other stratigraphic evidence from nine sites in the Cassarina Project”. *Aquatic Ecology*. Vol 35. pp 369–388. 2001.
- [3] S. R. Gislason. “Chemical composition of interstitial water and diffusive fluxes within the diatomaceous sediment in Lake Myvatn, Iceland”. *Aquatic Ecology*. Vol 38. pp 163–175. 2004.
- [4] M. Enache y T. Prairie. “WA-PLS diatom-based pH, TP and DOC inference models from 42 lakes in the Abitibi clay belt area (Quebec, Canada)”. *Journal of Paleolimnology*. Vol 27. pp 151–171. 2002.
- [5] J. A. Díaz. “Comportamiento monótonico de suelos diatomáceos”. *Revista Investigación de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol 12. no 1. pp 27–34. 2011.
- [6] C. Labrador. “Tierra de diatomeas TDDA, Silicio asimilable: Dióxido de Silicio (SiO<sub>2</sub>) amorfo”. AGROPULI SAS. Ficha Técnica: Enmienda de uso agrícola. 2015.
- [7] A. I. Fazlutdinova y N. V. Sukhanova. “Composition of Soil Diatoms in Zones of Impact from Oil. Production Complexes”. *Russian Journal of Ecology*. Vol 45. No 3. pp 188–193. 2014.
- [8] L. E. Antonides. “Diatomite”. U.S. *Geological Survey Mineral Commodity Summaries*. pp 56–57. 1998.
- [9] Y. Zhang, C. Guo, X Yao, “Engineering geological characterization of clayey diatomaceous earth deposits encountered in highway projects in the Tengchong region Yunnan, China”. *Engineering Geology*. Vol 167. pp 95–104. 2013.
- [10] X.H. Cheng, D.J.M Ngan Tillard, E.J. Den Haan, “The causes of the high friction angle of Dutch organic soils”. *Engineering geology*. Vol 93. pp 31–44. 2007.
- [11] A. M. Palomino, S. Kim, A. Summit, D. Fratta, “Impact of diatoms on fabric and chemical stability of diatom – kaolin mixtures”. *Applied Clay Science*. Vol 51. pp 287–294. 2011.
- [12] T. W. Lambe y R. V. Whitman, *Soil Mechanics*, México, Limusa, 1972, pp.582.
- [13] J. K. Mitchell, Kenichi Soga, *Fundamentals of soil behavior*, Edición 3, Hoboken NJ, John Wiley & Sons, 2005, pp.577.
- [14] S. Osorio, (2013) “Apuntes de Geotecnia con Énfasis en laderas citando a Holtz & Kovacs An Introduction to Geotechnical Engineering” Disponible en: <http://geotecnia-sor.blogspot.com.co>