



Estudio del comportamiento bajo esfuerzo triaxial de un suelo fino, a partir de la adición de una muestra de diatomeas multiespecie

Eder Adrián Mosquera Quintero ¹ y Milagros Del Valle Reyes Colmenares²

RESUMEN

En algunos depósitos naturales de suelo localizados alrededor del planeta, en países como Estados Unidos, China, Perú, Japón, Dinamarca México y Argentina, existen yacimientos de suelos diatomáceos [1]. En esta investigación se tomaron suelos diatomáceos de origen norteamericano, en el cual se observaron varias especies de diatomeas por medio del ensayo de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), estas especies por su morfología y simetría se clasificaron dentro del grupo de pennales con valvas alargadas. Las diatomeas identificadas presentan forma rectangular y ondulada, lo que aparentemente favorece la resistencia al esfuerzo cortante por su forma plana y angular generando una mayor trabazón.

Las muestras de suelo artificial se elaboraron en probetas cilíndricas de acrílico de 8 cm de diámetro y 20 cm de altura, las cuales tenían perforaciones cada centímetro para simular el drenaje del suelo. Se vertió el contenido de las muestras dentro de los acrílicos. Para permitir una consolidación del suelo artificial, éstos se dejaron al interior de un contenedor de mayor capacidad asegurado lateralmente por arena. Controladamente se aplicaron cargas verticales (entre 1kg y 16kg), que fueron transmitidas

al suelo, el incremento se hizo cada 24 horas sobre el espécimen en estudio.

Se realizaron una serie de ensayos de compresión triaxial en condición Consolidado Drenado (CD), bajo presiones de cámara de 100kpa, 200kpa y 400kpa; como conclusión, se reporta que, el ángulo de fricción interno efectivo de las muestras de suelo es mayor a medida que el contenido de diatomeas aumenta. Este comportamiento es inverso para la cohesión.

Las diatomeas Norteamericanas presentan una superficie más sinuosa y rugosa que las diatomeas Colombianas y Mexicanas; mostrando mayores proporciones en la amplitud y longitud tanto en las ondulaciones como en los surcos (hendiduras). De esta manera, las diatomeas norteamericanas presentan una superficie más irregular y discontinua.

La especie con mayor densidad de poros fue la diatomea norteamericana *Achnanthisidium Minutissimum*, con una lectura de aproximadamente 8 poros por μm^2 . La especie con el mayor tamaño de poros fue la diatomea

1 Especialista en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas, Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. edermosquera94@gmail.com
2 Especialista en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas, Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. milagritosreyes21@gmail.com

colombiana *Aulocoseira Granulata*, con un tamaño promedio de poro igual a $0.173 \mu\text{m}^2$.

PALABRAS CLAVE: Suelos diatomáceos, ensayo triaxial, consolidado drenado (CD), esfuerzo cortante, ángulo de fricción, cohesión y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

ABSTRACT

In some natural deposits of soil located around the planet, in countries such as the United States, China, Peru, Japan, Denmark, Mexico and Argentina, there are deposits of diatomaceous soils [1]. In this research, diatomaceous soils of North American origin were taken, in which several species of diatoms were observed by means of the Scanning Electron Microscopy (SEM) test, these species due to their morphology and symmetry were classified within the group of pennals with elongated valves. The diatoms identified have a rectangular and wavy shape, which apparently favors resistance to shear stress due to their flat and angular shape, generating greater interlocking.

The artificial soil samples were made in cylindrical acrylic specimens of 8 cm in diameter and 20 cm in height, which had perforations every centimeter to simulate soil drainage. The contents of the samples were poured into the acrylics. To allow a consolidation of the artificial soil, they were left inside a container of greater capacity secured laterally by sand. Controlled vertical loads were applied

(between 1kg and 16kg), which were transmitted to the ground, the increase was made every 24 hours on the specimen under study.

A series of triaxial compression tests were carried out in a drained consolidated condition (CD), under chamber pressures of 100kpa, 200kpa and 400kpa; as a conclusion, it is reported that the effective internal friction angle of the soil samples is greater as the diatom content increases. This behavior is inverse for cohesion.

North American diatoms have a more sinuous and rougher surface than Colombian and Mexican diatoms; showing greater proportions in breadth and length both in the undulations and in the grooves (fissures). In this way, North American diatoms have a more irregular and discontinuous surface.

The species with the highest pore density was the North American diatom *Achnanthisidium Minutissimum*, with a reading of approximately 8 pores per μm^2 . The species with the largest pore size was the Colombian diatom *Aulocoseira Granulata*, with an average pore size equal to $0.173 \mu\text{m}^2$.

KEYWORDS: Diatomaceous soils, triaxial test, drained consolidation (CD), shear stress, friction angle, cohesion and Scanning Electron Microscopy (SEM).

Introducción

Hay varios sitios en el mundo (Estados Unidos, China, Perú, Japón, Dinamarca, México y Argentina) donde se ha detectado la presencia de microfósiles de diatomeas en los depósitos naturales de suelo [1]. Estos yacimientos que contienen suelos diatomáceos, se caracterizan por tener propiedades físicas y mecánicas singulares, que no siguen las correlaciones obtenidas y aceptadas para la mayoría de los suelos [2].

Esta investigación tiene por objeto los diferentes depósitos de microfósiles de diatomeas (frústulas), ya que su influencia como material natural nano-estructurado, afecta las propiedades geotécnicas de los suelos.

En la actualidad, los fósiles de diatomeas se usan en gran medida en el sector agrícola, como fertilizantes de suelo y como bioindicadores de la calidad del agua [3].

Dentro de la poca literatura que existe respecto a los suelos diatomáceos y sus aplicaciones en obras de ingeniería civil, algunos estudios han concluido que, el contenido de diatomeas afecta el comportamiento del suelo, exhibiendo características como el aumento de los límites de Atterberg, disminución del índice de plasticidad y el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante [2], [4] y [5].

Teniendo en cuenta sus características únicas, hay un gran potencial en los suelos diatomáceos como material de construcción en obras de infraestructura vial; razón por la cual se hace necesario realizar investigaciones basadas en ensayos de laboratorio con el fin de evaluar su desempeño.

Para cumplir con el objetivo de esta investigación y realizar el análisis del comportamiento de un suelo fino, bajo el estándar de la cámara triaxial, a partir de la adición de una muestra de diatomeas multiespecie; se realizaron una serie de ensayos triaxiales en condición consolidado drenado, de acuerdo a la norma del Instituto Nacio-

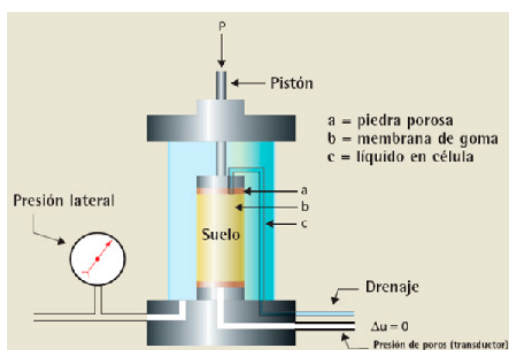


Figura 1. Esquema del ensayo triaxial
Fuente: [6]

nal de Vías (INVIAS) I.N.V. E - 153 de 2013 sobre muestras de suelo artificial dosificadas en peso, compuestos por caolín (matriz fina) y suelos diatomáceos de origen norteamericano. Ver figura 1.

La diatomita o tierra de diatomeas es un material poroso y un tipo de roca sedimentaria resultante de la acumulación y compactación de restos de diatomeas. Las diferentes investigaciones a cerca de los suelos diatomáceos muestran que las frústulas tienen una alta capacidad de absorción, bajo volumen y densidad [7].

Los esqueletos o frústulas de diatomeas son simétricos en su forma y contienen una gran proporción de vacíos [8]. Las frústulas de las diatomeas contienen un espacio esencialmente vacío, compuesto entre el 60% y 70% de su morfología. El espacio poroso intraesquelético de frústulas de diatomeas proporciona una cámara que puede almacenar agua [7].

El caolín es un mineral no renovable, es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas, principalmente [9]. El caolín está compuesto de partículas del tamaño de arcilla y partículas de suelo más pequeñas de 2 micrómetros lo que representan aproximadamente el 60% [7]. Unas de las características son: el valor de la gravedad específico de las partículas sólidas es 2.6, la dureza de 2, su color es blanco, brillo generalmente terroso mate, absorbe agua y su plasticidad es de baja a moderada [9].

Desarrollo teórico

El ensayo triaxial consiste en formar un espécimen cilíndrico de suelo y revestirlo con una membrana de látex, luego introducir el espécimen dentro de una cámara y someterlo a diferentes esfuerzos. Este tipo de ensayo es útil para determinar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante. De su ejecución se obtienen valores de ángulo de fricción y cohesión. Este ensayo tiene tres tipos de pruebas; prueba lenta (se permite la consolidación y el drenaje "CD"), prueba rápida (se permite la consolidación y no el drenaje "CU") y prueba rápida (no se permite la consolidación y el drenaje "UU"). La prueba utilizada en la presente investigación, fue la prueba lenta Consolidado Drenado, esta es usada en suelos granulares (arenas) y suelos finos, en donde los esfuerzos son soportados por las partículas sólidas [6], [10].

El ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), es una técnica de obtención de imágenes ampliamente utilizada en investigación de materiales, debido a su alta resolución y capacidades de analizar características morfológicas, estructurales y químicas de las muestras bajo estudio [11].

Trabajo de campo

En primer lugar, se obtuvo el material a utilizar Diatomeas de origen norteamericano, la cual es distribuida por la Empresa Multias Aseo y Salubridad ubicada en el Valle del Cauca – Colombia y es la encargada de importar las Diatomeas por la Compañía Diatomaceous Earth ubicada en Estados Unidos, proveniente de Minas más grandes de Agua Fresca.

Al material de Diatomeas provenientes de Estados Unidos se le realizó el ensayo SEM para determinar el tipo de especies que contiene, esta investigación fue realizada por la Escuela de Ingenieros Militares Esing y con la ayuda del Centro de Microscopia UNIANDES [4] los resultados arrojaron las siguientes diatomeas identificadas; Orizaformis holarctica, Navicula cryptocephala, Achnanthis minutissimum y Nitzschia soratensis de origen Norteamérica. De la misma manera a través de la investigación realizada por Zuluaga y Slebi [5] se tomaron las micrografías de la diatomea Aulocoseira Granulata (colombiana) y Cosconodiscus Centralis (mexicana), esto con el fin de tener variedades de especies de diferentes países y empezar a realizar la respectiva caracterización.

Con el objeto de analizar la caracterización de las muestras de diatomeas de las diferentes especies, se usó el software Imagej (versión 1.53). Este software permitió realizar múltiples lecturas como: ancho, alto, diámetro, área de poros, cantidad de poros, densidad de poros por unidad de área, perfiles, superficies y otras mediciones, para lograr estos datos en el software fue necesario calibrar la escala de cada micrografía y guardar las lecturas en el programa Imagej. En la figura 2, se muestra un ejemplo de una de las lecturas que puede realizar el software Imagej, permitiendo así mostrar el perfil de la superficie de una de las especies de diatomeas, este resultado se evidencia en la figura 3.

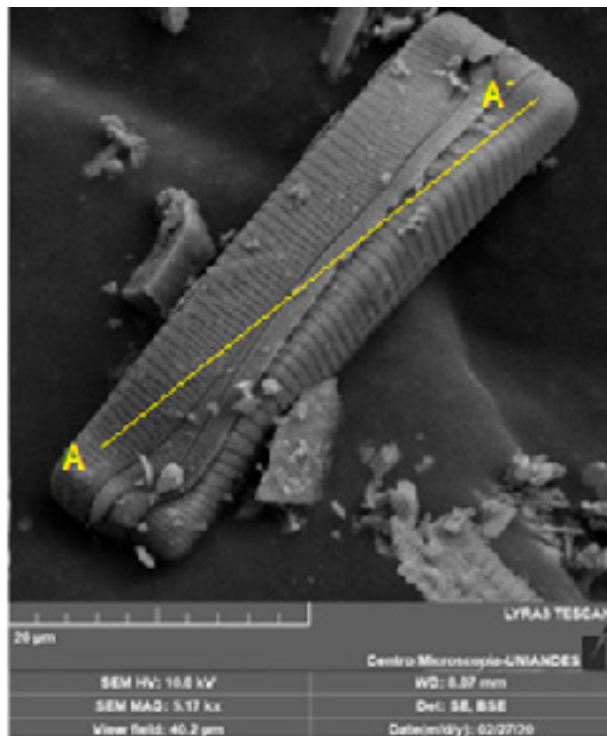


Figura 2. Mediciones con el software Imagej.
Fuente: [4]

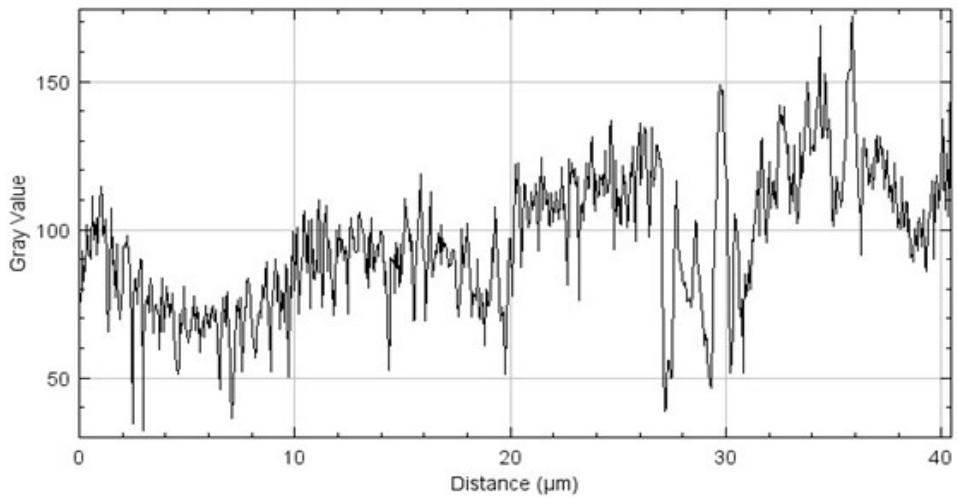


Figura 3. Perfil de la superficie.
Fuente: Autores

De la misma manera, en la figura 4 se evidencia cómo se realizó el conteo de poros, además se muestra su forma y tamaño.

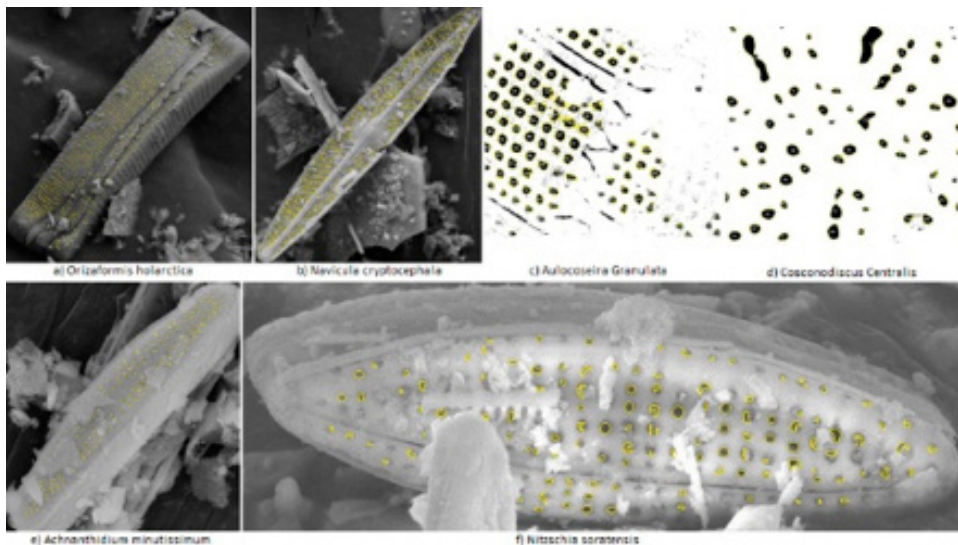


Figura 4. Recuento de poros por diatomea.
Fuente: autores del proyecto.

Por otra parte, y en relación con la elaboración de las muestras de suelo artificial (Diatomeas – Caolín), se prepararon probetas dosificadas en peso con los materiales mezclados (véase tabla 1), formando una masa homogénea, esta masa se vertió en moldes cilíndricos de acrílico de 8 cm de diámetro y 20 cm de altura, como se muestra en la figura 5.

Tabla 1. Dosificación en peso de las muestras de suelo

Diatomeas		Caolín	
Porc. (%)	Peso (grs)	Porc. (%)	Peso (grs)
100	590	0	0
80	566	20	142
60	496	40	330
40	378	60	566
20	212	80	850
0	0	100	1180

Fuente: autores del proyecto.



Figura 5. Moldes con las muestras Diatomea – Caolín.

Fuente: autores del proyecto.

Estas mismas muestras fueron consolidadas por un periodo de cinco (5) días con esfuerzos progresivos (véase tabla 2), iniciando con un esfuerzo de 5 kpa hasta llegar a un esfuerzo máximo de preconsolidación de 80 kpa. Luego, se extrajeron de los moldes (véase figura 6), y posteriormente fueron talladas bajo el estándar de la cámara triaxial (véase figura 7).

Tabla 2. Tiempos de aplicación de esfuerzos

Tiempo (h)	Carga (kg)	Esfuerzo (kpa)
0 – 24	1	5
24 – 48	2	10
48 – 72	4	20
72 – 96	8	40
96 – 120	16	80

Fuente: autores del proyecto.



Figura 6. Extracción de las muestras luego de la preconsolidación inicial
Fuente: autores del proyecto.

Las muestras talladas fueron montadas en la cámara triaxial, se aplicó presión y contrapresión inicial de 100 kpa y 70 kpa respectivamente. Ver figura 8. Para cada ensayo triaxial (CD), se montaron 3 muestras con esfuerzos de confinamiento (σ_3) diferentes de 100 kpa, 200 kpa y 400 kpa. Luego se aplicó el esfuerzo axial principal (σ_1) para inducir el fallo en las muestras. Una vez que se alcanzó el máximo esfuerzo desviador (falla) o el 15% de la deformación axial, se desmontó el espécimen del equipo, se registró su peso húmedo, luego se llevó al horno y finalmente se registró su peso seco para el cálculo del contenido de humedad final. Ver figura 9.



Figura 7. Tallaje de las muestras.

Fuente: autores del proyecto.



Figura 8. Sistema de presión y contrapresión del ensayo triaxial.

Fuente: autores del proyecto.



Figura 9. Desmonte y lectura de humedad final del espécimen.

Fuente: autores del proyecto.

Discusión de resultados

Es relevante resaltar que en este análisis los resultados parten de la utilización de una muestra multi-especie, y comparativamente en algunos factores (perfil, superficie, tamaño de poros, densidad de poros y límites de atterberg) se utilizaron los resultados de la investigación realizada por "D. A. Zuluaga y C. J. Slebi" denominada "Caracterización de suelo diatomáceo y respuesta a la consolidación unidimensional", la cual fue publicada en el año 2016 [5]. En estos estudios se analizan unas muestras de suelo diatomáceo de dos orígenes, una mexicana y otra colombiana, cuyas especies son *Cosconodiscus Centralis* y *Aulocoseira Granulata*, respectivamente. Los suelos diatomáceos Norteamericanos estudiados, están compuestas por frústulas de varias especies, de las cuales se reconocieron la *Orizaformis holarctica* (Norteamericana), *Navicula cryptocephala* (Norteamericana), *Achnanidium minutissimum* (Norteamericana) y *Nitzschia soratensis* (Norteamericana), ver figura 4.

Respecto al análisis de la caracterización de las diferentes especies de diatomeas, se estudió la rugosidad de las frústulas en base al perfil que describen haciendo uso del software Imagej. Se analizaron 6 parámetros que son: picos, indican los puntos más altos del perfil; valles, representan los puntos más bajos del perfil; extensión de rugosidad, es la longitud entre picos; extensión de ondulación, representa la longitud de las irregularidades del perfil; la amplitud de ondulación, se refiere a la diferencia de altura en la ondulación del perfil y la amplitud de rugosidad, detalla la diferencia de altura de los surcos. Véase figura 10.

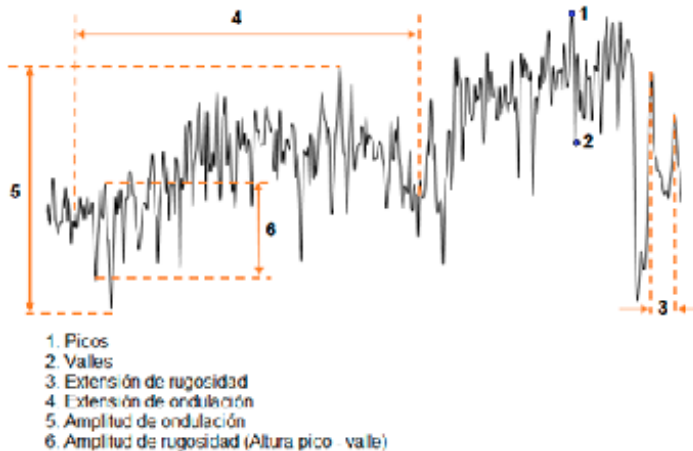


Figura 10. Esquema del análisis de la rugosidad.

Fuente: autores del proyecto.

Este análisis de rugosidad muestra que las diatomeas norteamericanas presentan variedad en las ondulaciones del perfil, con longitud de ondulaciones entre $3\mu\text{m}$ y $12\mu\text{m}$ aproximadamente. Además, presentan una amplitud de ondulación entre 100 unidades (und) y 175 unidades (und) aproximadamente, obteniendo un valor promedio entre los 126 und en la escala de grises. La diatomea mexicana presenta el menor valor en la amplitud de ondulación con una lectura de 99.8 und en la escala de grises, también obtiene una de las menores longitudes de ondulación con una lectura de 3.67 und. La diatomea colombiana tiene unas de las mayores lecturas tanto en extensión como en amplitud de ondulación, con valores de $8.78\mu\text{m}$ y 134.4 und respectivamente.

La presencia masiva de poros en las diatomeas es una característica notoria en su estructura física, estas protuberancias permiten el paso de agua y partículas de menor tamaño a través de la frústula, hasta su almacenamiento en el interior. En la figura 11 se muestra que, las diatomeas norteamericanas *Orizaformis Holarctica*, *Navicula Cryptocephala*, *Achnanthidium Minutissimum* y *Nitzschia Soratensis*, tienen un tamaño medio de poros de $0.006\mu\text{m}^2$, $0.014\mu\text{m}^2$, $0.004\mu\text{m}^2$ y $0.02\mu\text{m}^2$ respectivamente, seguido de la diatomea mexicana (*Cosconodiscus Centralis*) que tiene un tamaño promedio de poros de $0.028\mu\text{m}^2$ y, por último, la diatomea colombiana (*Aulocoseira Granulata*) la cual tiene el mayor tamaño medio de poros de $0.173\mu\text{m}^2$.

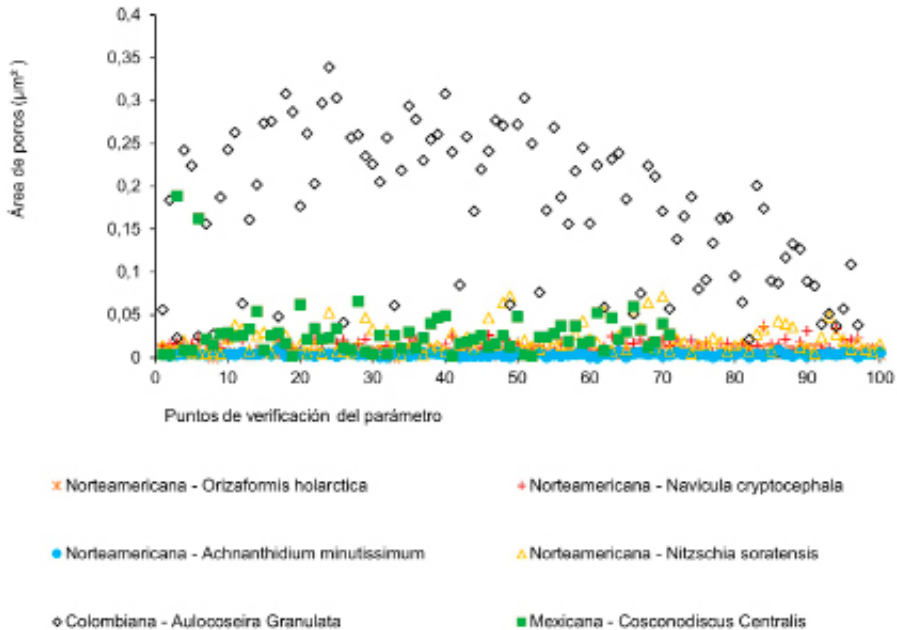


Figura 11. Área de poros de las diferentes diatomeas.
Fuente: autores del proyecto.

Respecto al análisis de la influencia de la morfología en el comportamiento de las diatomeas, se realizaron ensayos de límites de consistencia en muestras de suelo artificial con diferentes especies de diatomeas y en distintas proporciones. En la tabla 3 se registran los resultados de los límites de consistencia en función del contenido de diatomeas.

Tabla 3. Límites de Atterberg de las muestras de diatomeas según su origen.

		Dosificación						
		0% Diatomeas	20% Diatomeas	40% Diatomeas	60% Diatomeas	80% Diatomeas	100% Diatomeas	
Norteamericana	IP	12.4	16.3	17.9	17.7	20.3	27.7	
	WP	21.5	30.4	39.3	48.3	57.7	61.1	
	WL	33.9	46.7	57.2	66.0	78.0	88.7	
Colombiana	IP	20.0	22.0	24.0	31.0	40.0	49.0	
	WP	24.0	28.0	32.0	39.0	45.0	51.0	
	WL	44.0	50.0	56.0	70.0	85.0	100.0	
Mexicana	IP	20.0	18.2	14.7				
	WP	24.0	30.4	42.3				
	WL	44.0	48.6	57.0			131.7	

Fuente: autores del proyecto.

Los resultados de la tabla 3 están representados en la figura 12, donde se aprecia que las diatomeas influyen directamente en la consistencia del suelo, en la medida en que su concentración aumenta.

Los resultados de la figura 12, muestran que el comportamiento de los especímenes en cuanto a sus límites de consistencia, son influenciados no solo por la cantidad de diatomeas presentes en cada muestra, sino que también son afectados por su forma, la cual permite tener una mayor capacidad de adsorción de agua y partículas. La diatomea colombiana (*Aulocoseira Granulata*) tiene forma cilíndrica además de sus poros, sin embargo, no es la que tiene la mayor capacidad de retención de líquido (véase figura 12.a), ya que su centro es hueco tal como se muestra en la figura 13. Mientras que la diatomea mexicana (*Cosconodiscus Centralis*) por su forma de disco ocupa una mayor superficie de contacto, además está completamente constituida en su centro por pequeños tubos interconectados, lo cual le permite almacenar mayor cantidad de fluidos (figura 14).

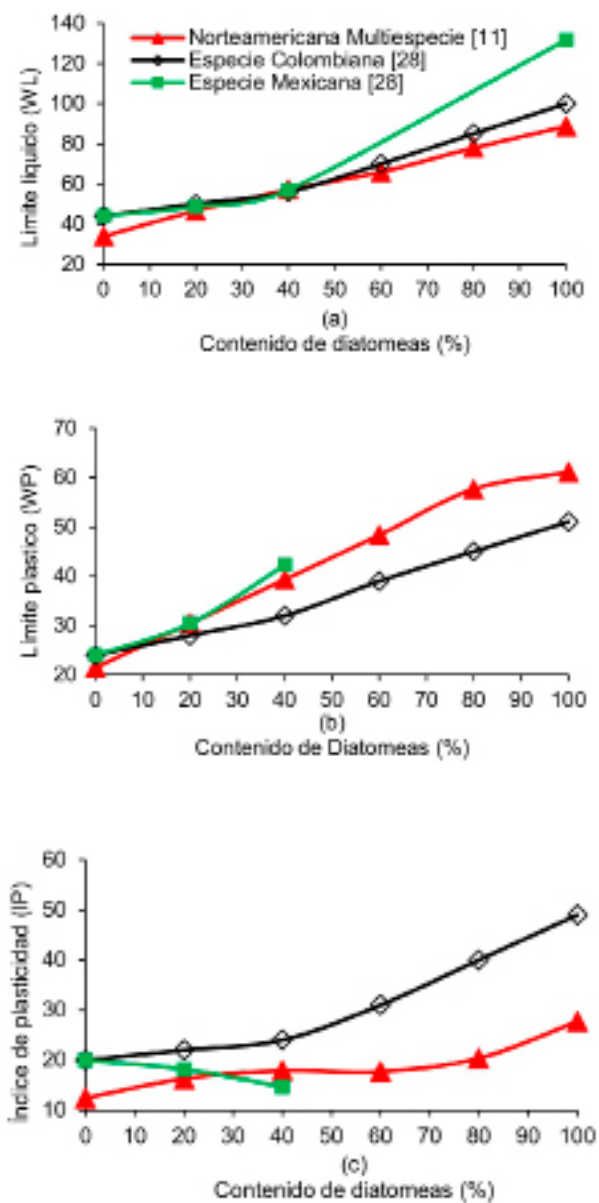


Figura 12. Límites de Atterberg.

Fuente: autores del proyecto.

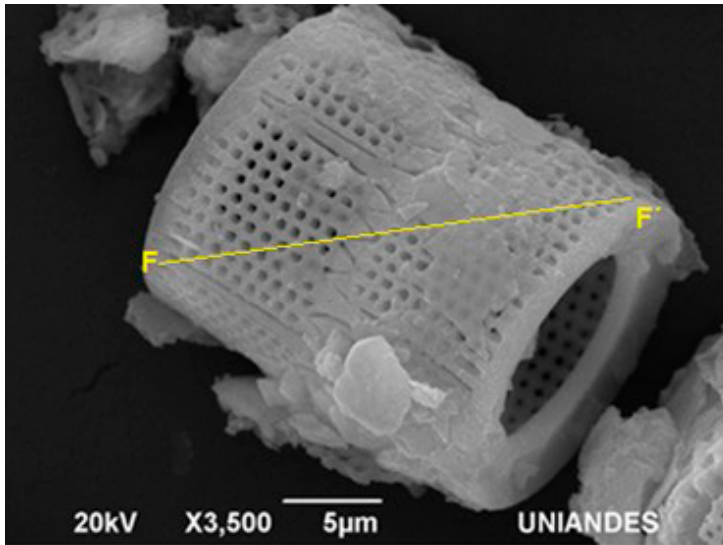


Figura 13. Aulocoseira Granulata.
Fuente: autores del proyecto.

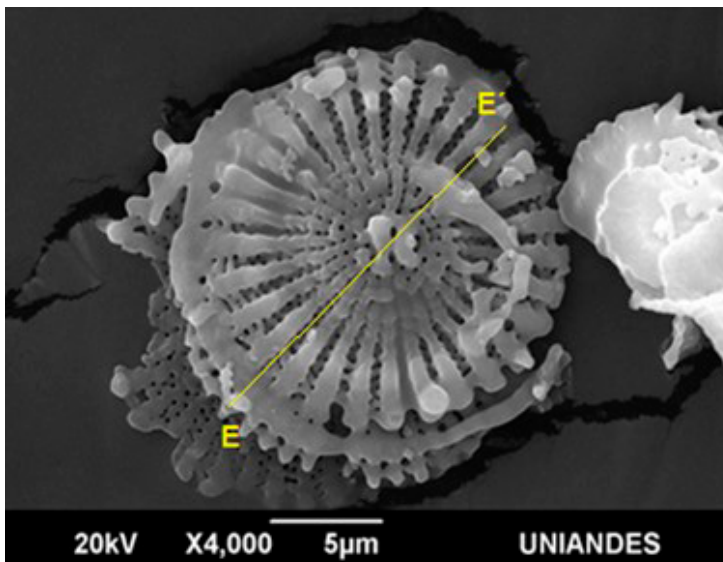


Figura 14. Cosconodiscus Centralis.
Fuente: autores del proyecto.

Respecto a los resultados del análisis de la resistencia del suelo artificial, inicialmente se registró el cambio en las dimensiones de los especímenes, cuando fueron sometidos a esfuerzos de preconsolidación inicial durante la etapa de creación de las probetas. Los resultados sugieren un aporte significativo de las diatomeas a la resistencia del suelo, ya que a medida en que la concentración de diatomeas disminuye, las muestras presentan una mayor compresibilidad. Véase figura 15.

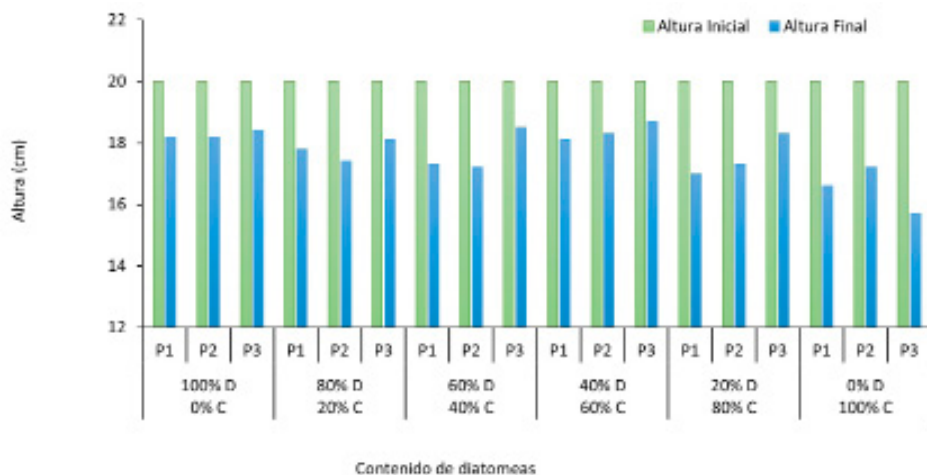


Figura 15. Alturas iniciales y finales luego de la preconsolidación en las muestras de suelo diatomáceo de origen norteamericano.

Fuente: autores del proyecto.

A partir de los resultados representados en la figura 16, se puede deducir que la resistencia del esfuerzo cortante en el suelo es dependiente del contenido de diatomeas, ya que para un esfuerzo de 400 kpa y un contenido de diatomeas del 100%, la resistencia del esfuerzo cortante pico es de aproximadamente 662Kpa, mientras que para el mismo esfuerzo normal y un contenido de diatomeas del 0%, la resistencia del esfuerzo cortante es de aproximadamente 146Kpa.

De la misma manera, el comportamiento de las muestras con un esfuerzo de 400 kpa y contenido de diatomeas del 100%, 80%, 60% y 0%, presentan una estabilización en las lecturas de esfuerzo cortante al experimentar una deformación del 10% en su longitud, a diferencia de las muestras con porcentaje de diatomeas del 40% y 20%, que presentan el fallo antes del 8% y una estabilización en el esfuerzo cortante luego del 20% en sus deformaciones, respectivamente. Esta tendencia también se presenta en las muestras con esfuerzos normales de 100 kpa y 200 kpa, con un contenido de diatomeas del 100%, 60% y 0%, en donde el esfuerzo cortante se estabiliza para una deformación axial de las muestras del 10%, mientras que las muestras con los mismos esfuerzos y contenido de diatomeas del 80%, 40% y 20%, muestran estabilización en el esfuerzo cortante al experimentar una deformación axial del 20%, 15% y 18% respectivamente.

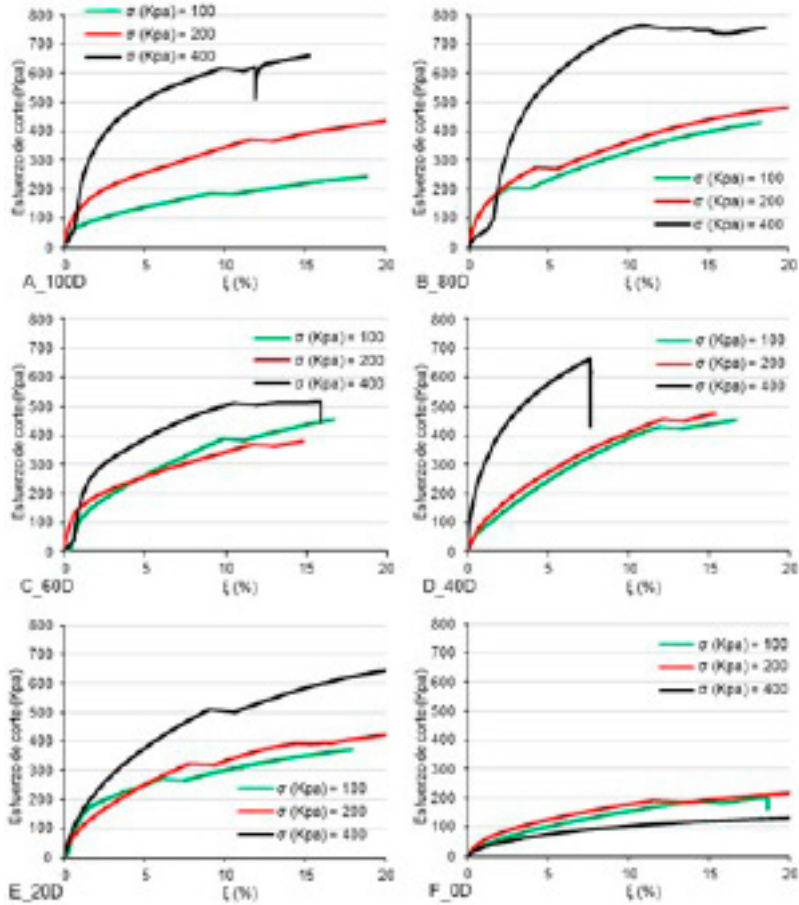


Figura 16. Esfuerzo cortante vs deformación unitaria.

Fuente: autores del proyecto.

Los resultados presentados en la figura 16, demuestran que la presencia de diatomeas aumenta la resistencia al esfuerzo cortante pico en los especímenes ensayados, sin embargo, este aumento no se produce de forma proporcional al contenido de diatomeas. Esto indica, que el tamaño de las partículas en distintas proporciones en los materiales, presentan una mayor trabazón y ocupan la mayor cantidad de vacíos, ofreciendo así una mayor resistencia para determinadas dosificaciones. Véase figura 17.

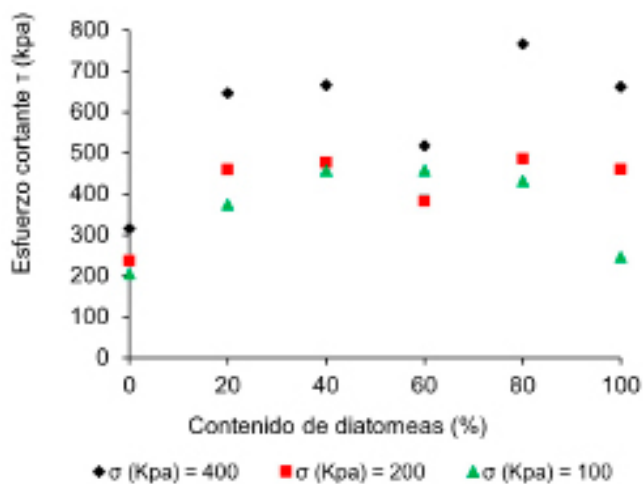


Figura 17. Variación del esfuerzo cortante con respecto al contenido de diatomeas.
Fuente: autores del proyecto.

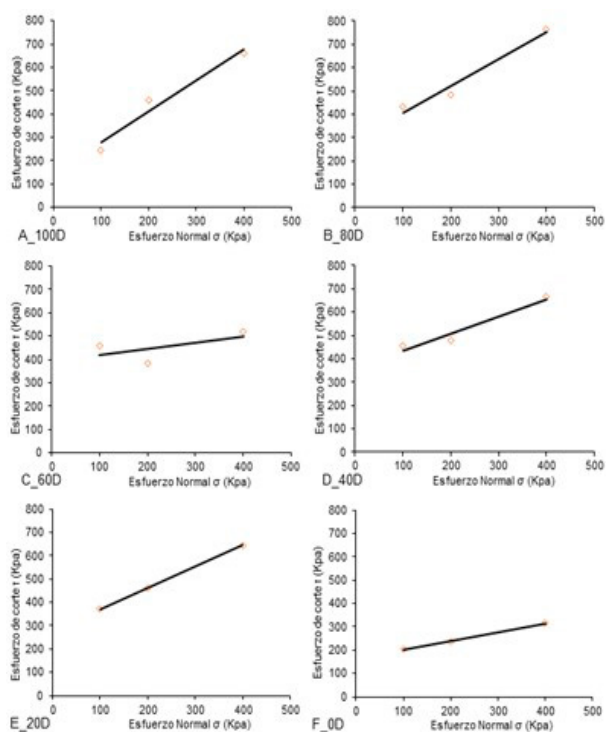


Figura 18. Esfuerzo cortante vs esfuerzo normal.
Fuente: autores del proyecto.

En la figura 18, se evidencian los resultados del esfuerzo cortante versus esfuerzo normal de los especímenes ensayados. Las lecturas muestran que, las probetas reflejan un comportamiento irregular a medida que su concentración de diatomeas disminuye. Se aprecia que los esfuerzos de corte son superiores en las muestras con dosificación de diatomeas del 80% respecto a las del 100%, de igual manera, los resultados muestran una mayor resistencia al esfuerzo cortante, en las probetas con contenido de diatomeas del 40% con respecto a las de 60%.

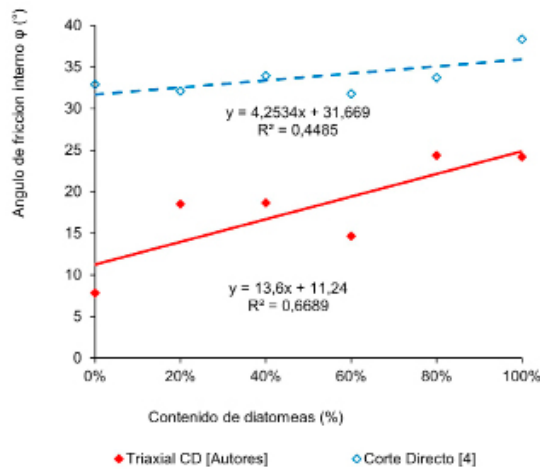


Figura 19. Variación del ángulo de fricción con respecto al contenido de diatomeas norteamericanas multiespecie.
Fuente: autores del proyecto.

La figura 19, muestra la comparación de los ángulos de fricción internos de las muestras de diatomeas norteamericanas multiespecie, entre los datos obtenidos a través del ensayo de corte directo [4] y el ensayo triaxial CD. En general, se muestra una tendencia creciente en los ángulos de fricción cuando el contenido de diatomeas aumenta, este valor es más elevado en el ensayo de corte directo, obteniendo valores entre 31.79° y 38.32°. Sin embargo, este comportamiento es más evidente en los datos obtenidos a través del ensayo triaxial CD, en donde se obtienen valores del ángulo de fricción entre 7.84° y 24.35°, resultando lecturas con una línea de regresión más inclinada.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados de la caracterización morfológica se observó que, las diatomeas Norteamericanas presentan una superficie más sinuosa y rugosa que las diatomeas Colombianas y Mexicanas; mostrando mayores proporciones en la amplitud y longitud tanto en las ondulaciones como en los surcos (hendiduras). De esta manera, las diatomeas norteamericanas presentan una superficie más irregular y discontinua. La especie con mayor densidad de poros fue la diatomea Norteamericana *Achnanthydium Minutissimum*, con una lectura de aproximadamente 8 poros por μm^2 . La especie con el mayor tamaño de poros fue la diatomea Colombiana *Aulocoseira Granulata*, con un tamaño promedio de poro igual a $0.173 \mu\text{m}^2$, el área parcial de una cara de la diatomea fue de $162.09 \mu\text{m}^2$ y el área total de poros en esa zona fue de $16.93 \mu\text{m}^2$, por lo tanto, los poros representan un 10.44% de su superficie.

En referencia al análisis de los límites de consistencia del suelo, estos se ven afectados por la presencia de diatomeas, formando así una relación directamente proporcional entre, los límites de Atterberg y el contenido de diatomeas. De esta manera, se aprecia que el límite líquido (WL) y el límite plástico (WP), tienden a aumentar conforme crece la concentración de diatomeas en los especímenes. Durante el proceso de consolidación en los ensayos triaxiales CD, se encontró una relación entre el cambio volumétrico y la proporción de los materiales (Diatomea – Caolín) en los especímenes, donde las dosificaciones con un solo material (100% diatomeas y 100% caolín) son más susceptibles al cambio volumétrico que las dosificaciones que mezclan estos materiales (80% Diatomeas – 20% Caolín, 60% Diatomeas – 40% Caolín, 40% Diatomeas – 60% Caolín y 20% Diatomeas – 80% Caolín).

De acuerdo con los resultados del análisis de la resistencia al corte en los especímenes, se encontró que la morfología de los microfósiles de las diatomeas cumplen un papel fundamental en la resistencia al esfuerzo cortante, ya que las formas rectangulares (*Orizaformis Holarctica*), elipsoidales (*Navicula Cryptocephala*, *Achnanthydium Minutissimum* y *Nitzschia Soratensis*) y circulares (*Cosconodiscus Centralis*), dieron mayor resistencia al esfuerzo cortante que los especímenes con diatomeas en forma cilíndrica (*Aulocoseira Granulata*). Lo anterior fue posible, ya que las formas planas y angulares favorecen una mayor trabazón en comparación con las formas redondeadas y de mayor tamaño.

Se concluye que, la resistencia al esfuerzo cortante es dependiente del contenido de diatomeas presentes en las muestras artificiales Diatomeas – Caolín. Sin embargo, los resultados describen una trayectoria irregular, donde los especímenes con un porcentaje de 80% y 40% de contenido de Diatomeas, presentan esfuerzos cortantes pico mayores a las probetas con un porcentaje de 100% y 60% de Diatomeas respectivamente.

Los resultados obtenidos por medio de ensayos triaxiales en condición consolidado drenado, muestran una marcada influencia en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, ya que el ángulo de fricción interno tiene un comportamiento creciente, conforme aumenta el contenido de diatomeas hasta un valor de 24.18° . Lo anterior es posible, gracias a la morfología, rugosidad en la superficie y la trabazón entre los microfósiles de diatomeas.

Las trayectorias que describen al esfuerzo cortante pico vs el esfuerzo normal en los especímenes, se van nivelando conforme va disminuyendo su contenido de Diatomeas. Esto confirma las conclusiones de otras investigaciones respecto a la influencia de materiales naturales micro-estructurados (Diatomeas) en las propiedades geotécnicas de los suelos.

Las investigaciones sobre las diatomeas, son relevantes durante la exploración y la planeación de un proyecto. Durante la etapa de exploración se puede validar si hay presencia de este material en el subsuelo, si lo hay, las consideraciones de diseño deben ser diferentes, ya que un suelo fino con un límite líquido alto se asocia a una menor resistencia, esta situación no pasa en suelos diatomáceos [2]. De igual manera, durante la planificación se deben considerar en la ejecución de obras ingenieriles, como la construcción de un terraplén, la estabilización de un talud, la construcción de una vía, ya que su influencia en el comportamiento del suelo es importante. En cuanto a otras aplicaciones de las diatomeas, se puede mencionar que, por su alta capacidad de absorción, baja plasticidad y aporte en la resistencia al esfuerzo cortante, pueden ser usadas para dosificar un material común, con el fin de aumentar su potencial uso en la estabilización de un suelo.

Con el fin de fortalecer los resultados derivados de esta investigación, se pueden considerar otras variables como; ampliar la cantidad de especies, cambiar las condiciones de humedad y temperatura, analizar la profundidad de los poros y verificar su potencial de absorción.

Referencias

- [1] M. C. Lora Vilchis, F. O. López Fuerte y C. A. Pérez Rojas, «Algas de cristal; diatomeas,» *Recursos Naturales y Sociedad*, vol. Vol. 6, n° 1, pp. 25-42, 17 Abril 2020.
- [2] Díaz Rodríguez y J. Abraham, «Comportamiento monotónico de suelos diatomáceos,» *Investigación de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, pp. 27-34, 2011.
- [3] L. Baglione, «Usos de la tierra diatomea,» *Tecnicaña*, vol. 27, pp. 31-32, 2011.

- [4] D. S. Rojas y Y. P. Montés, «Estudio del comportamiento (respuesta volumétrica y el esfuerzo cortante) de un suelo fino a partir de la adición de diatomeas,» M.S. Tesis Departamento de Ingeniería, Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá D.C., 2020.
- [5] D. A. Zuluaga y C. J. Slebi, «Caracterización de suelo diatomáceo y respuesta a consolidación unidimensional,» *Ingenieros Militares*, vol. 11, p. 38, 2016.
- [6] U. d. P. Vasco, «Calculo de la Resistencia en suelos,» de *Fundamentos de mecánica de suelos*, España, 1984, p. 23.
- [7] J. A. Díaz Rodríguez y R. González Rodríguez, «Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,» de 18 th *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, París, 2013.
- [8] A. F. Amaya y O. J. Cuadros, «Análisis del comportamiento hidráulico - mecánico de un suelo diatomáceo de la formación sabana aplicando diferentes gradientes térmicos,» M.S. Tesis Departamento de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2018.
- [9] J. P. González Torres, «Capacidad de absorción de las arcillas diatomáceas y su aplicación en la industria de hidrocarburos,» de *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 2020.
- [10] O. V. Salas, «Ensayos triaxiales para suelos,» *Métodos y Materiales*, vol. 1, pp. 14-24, 2011.
- [11] J. Itsman Clavijo, «Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM),» *Penagos*, vol. III, n° 3, pp. 133-146, 2013.