Ingeniería Investigación y Tecnología
volumen XXV (número 3), julio-septiembre 2024 1-12
ISSN 2594-0732 FI-UNAM artículo arbitrado
Información del artículo: Recibido: 25 de noviembre de 2022, aceptado: 29 de abril de 2024
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) license
https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.018

Ingeniería
Investigación y
Tecnología

Revisión de casos de identificación y estabilización química de suelos dispersivos
Review of identification and chemical stabilization cases of dispersive soils

García-Ezquivel Cesar Augusto
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería, Querétaro, México
División de Estudios de Posgrado
Correo: jordan_cesar23@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0002-5522-5122

Rojas-González Eduardo
Universidad Autónoma de Querétaro
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería, Querétaro, México
Correo: erg@uaq.mx
https://orcid.org/0000-0005-055X

Resumen

En la naturaleza existen suelos que son problemáticos para las obras civiles debido a las deformaciones volumétricas que sufren con la variación del contenido de humedad, entre ellos se encuentran los suelos dispersivos. Este tipo de suelos, presentan un alto contenido en sodio por lo cual entra fácilmente en suspensión en presencia con el agua. Esto genera erosión rápida e inesperada, incluso si el flujo es lento, ocasionando inestabilidad en la estructura del suelo, viéndose reflejado en asentamientos diferenciales que causan daños a las obras civiles que utilizan este material como desplante sin un tratamiento previo. La identificación temprana de los suelos dispersivos permite poder tomar mejores decisiones durante el diseño y procesos constructivos para evitar los problemas que ocasionan. Se realizó una revisión de métodos para la identificación de este tipo de material, entre las cuales están pruebas físicas como: La Prueba de Crumb, Doble Hidrómetro, Prueba Pinhole y pruebas químicas como: Porcentaje de Sodio Intercambiable, Relación de Absorción de Sodio y el Método Químico de Sherard. Sin embargo, por el tipo de equipo y tiempos necesarios en estas pruebas continúa siendo imposible realizarlas en campo, por lo que la prueba de Crumb es más práctica en esta situación. También se mencionan algunos aditivos para la estabilización química de suelos dispersivos, utilizados con la finalidad de reducir o eliminar esta propiedad perjudicial. Los aditivos utilizados son sulfato de aluminio, material puzolánico, cenizas volcánicas tipo C y cal. La dispersividad del suelo aplicando 5 % de material puzolánico se reduce 25.79 %, con 7 y 9 % de cal se reduce 26.60 y 36 %, respectivamente, mientras que con un 10 % de ceniza volcánica tipo C y 3 % de sulfato de aluminio se reduce 100 %. Es necesario realizar una evaluación económica de la estabilización química con los aditivos mencionados para obtener una relación costo-beneficio que nos permita valorar cuál aditivo es más recomendable.
Descriptores: Suelos dispersivos, grado de dispersión, pruebas físicas, pruebas químicas, estabilización química.

Abstract

In nature there are soils that are problematic for civil works due to the volumetric deformations that they suffer with the variation in moisture content, among them are dispersive soils. This type of soil has a high sodium content, which is why it easily enters suspension in the presence of water. This generates rapid and unexpected erosion, even if the flow is slow, causing instability in the soil structure, which is reflected in differential settlements that cause damage to civil works that use this material as soil without prior treatment. The early identification of dispersive soils allows better decisions to be made during the design and construction processes to avoid the problems they cause. A review of methods for the identification of this type of material was carried out, among which are physical tests such as; the Crumb Test, Double Hydrometer, Pinhole Test and chemical tests such as; Exchangeable Sodium Percentage, Sodium Absorption Ratio and the Sherard Chemical Method. However, due to the type of equipment and times required for these tests, it is still impossible to perform them in the field, so the Crumb test is more practical in this situation. Some additives for the chemical stabilization of dispersive soils, used with the purpose of reducing or eliminating this harmful property, are also mentioned. The additives used are: aluminum sulfate, pozzolanic material, type C volcanic ash and lime. The dispersivity of the soil applying 5 % of pozzolanic material is reduced by 25.79 %, with 7 and 9 % of lime it is reduced by 26.60 and 36 % respectively, while with 10 % of type C volcanic ash and 3 % of aluminum sulfate it is reduced 100 %. It is necessary to carry out an economic evaluation of the chemical stabilization with the aforementioned additives to obtain a cost-benefit ratio that allows us to assess which additive is most recommended.
Keywords: Dispersive soils, degree of dispersion, physical tests, chemical tests, chemical stabilization.

https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.018

Introducción

En la naturaleza se han encontrado arcillas altamente erosionables, denominadas como arcillas o suelos dispersivos. Este tipo de suelos fue identificado, por primera vez, en el área de la agricultura aproximadamente hace 100 años, pero se introdujo este tema en el área de la ingeniería civil entre los años de 1940 y 1960 (Garay & Alva, 1999).

A partir de la década de los 70, se empezó a reconocer la relación entre la dispersividad de los suelos y las fallas que estaban presentado algunas represas de tierra en Estados Unidos y Australia a causa de la erosión y tubificación en sus cortinas. En 1972 se empezó a producir información acerca de esta característica de los suelos y a partir de 1976 los estudios de dispersividad se incluyeron en los análisis geotécnicos previos al diseño y construcción de obras civiles que podían estar sometidas a los efectos de la erosión del suelo (Sherard & Decker, 1978).

Los suelos dispersivos generalmente son arcillas de origen aluvial y suelos derivados de rocas depositadas en ambientes marinos. De acuerdo con el mapa de suelos del mundo realizado por la FAO/UNESCO en 1976, se estima que el área total global de suelos salinos es de 397 millones de hectáreas y de suelos sódicos de 434 millones de hectáreas (Tabla 1). Pueden ser encontrados en regiones de Brasil, Vietnam, Australia, México, Tailandia, India, Venezuela y en el sur de Estados Unidos (Abbaslou *et al.,* 2016).

En 1977 Sherard & Decker observaron que la mineralogía, las propiedades químicas de la arcilla y la cantidad de sales (disueltas en los poros y en el agua que se infiltra en su estructura) tienen una fuerte relación con la erosión por dispersión de estos suelos (Glez & Novoa, 2008). Por lo tanto, las arcillas que resisten la erosión interna se diferencian de las arcillas dispersivas por el tipo de cationes que contienen, siendo el sodio (Na^{+}) el catión predominante en estas últimas, mientras que en las arcillas ordinarias predomina el Calcio (Ca^{2+}), Potasio (K^{+}) y Magnesio (Mg^{2+}) (Holmgren & Flanagan, 1977; Sherard *et al.,* 1976).

La presencia del sodio aumenta el espesor de la doble capa de agua difusa que rodea la partícula, haciendo que las fuerzas repulsivas excedan a las fuerzas de atracción de tal manera que las partículas entren fácilmente en suspensión en presencia de agua (McElroy, 1987). Esto genera erosión rápida e inesperada, incluso si el flujo es lento, lo que causa inestabilidad en la estructura del suelo, viéndose reflejado en asentamientos diferenciales que causan daños a las obras civiles que utilizan este material como desplante sin un tratamiento previo.

La identificación temprana de los suelos dispersivos permite poder tomar mejores decisiones durante el diseño y procesos constructivos para evitar los problemas que ocasionan. Por ello a lo largo de la historia se han realizado extensas investigaciones sobre métodos de identificación de suelos dispersivos y técnicas para reducir o eliminar esta propiedad perjudicial, siendo más utilizada la estabilización química.

Desarrollo

Metodología para la identificación de suelos dispersivos

Cuando se tiene como propósito identificar la presencia de suelos dispersivos, se debe iniciar con la visita a

Tabla 1. Frecuencia y extensión de suelos dispersivos en el mundo (Abbaslou *et al.,* 2016)

Región	Área total	Suelos salinos	%	Suelos sódicos	%
	Mha	Mha		Mha	
África	1899.10	38.70	2.00	33.50	1.80
Asia, el Pacífico y Australia	3107.20	195.10	6.30	248.60	8.00
Europa	2010.80	6.70	0.30	72.70	3.60
América Latina	2038.60	60.50	3.00	50.90	2.50
Cerca del Este	1801.90	91.50	5.10	14.10	0.80
Norte América	1923.70	4.60	0.20	14.50	0.80
Total	12781.30	397.10	3.10	434.30	3.40

campo determinando si hay indicadores en la superficie de la presencia de este material. Estos indicadores son: escaza vegetación debido a la salinidad, patrones de erosión inusuales como la presencia de taludes pronunciados formados por cortes profundos causados por la erosión, agujeros en paredes verticales, cuevas y túneles similares al proceso de disolución conocido como Karst, canales de agua natural con curvas cerradas de 90 grados y turbidez excesiva en cualquier almacenamiento de agua (Abbaslou *et al.,* 2016).

Sin embargo, el análisis visual de los indicadores mencionados se dificulta en regiones llanas, donde las arcillas dispersivas se pueden encontrar ocultas cubiertas por una capa de materia orgánica u otro material. Además, valorar las propiedades dispersivas del suelo no se puede realizar visualmente ni usando pruebas de identificación estándar como análisis de tamaño de partículas, límites de Atterberg, y pruebas comparables (Abbaslou *et al.,* 2020). Por esta razón, se han desarrollado métodos específicos para identificar las arcillas dispersivas.

Los métodos físicos más utilizados para determinar la dispersividad en suelos arcillosos son la Prueba de Crumb, la Prueba del Doble Hidrómetro y la Prueba del Agujero Pinhole. Sin embargo, los resultados obtenidos de estas pruebas han dado cierta incertidumbre en la clasificación de la categoría de media dispersividad, debido a la falta de criterios definidos para el caso donde se presentan bajas velocidades de flujo de agua. En tales casos es necesario realizar análisis químicos en conjunto con las pruebas físicas mencionadas (Abbaslou *et al.,* 2020; DJOKOVIĆ *et al.,* 2018). Entre los análisis químicos se encuentran la prueba de Porcentaje de Sodio Intercambiable (ESP) y la Relación de Absorción de Sodio (SAR), estas pruebas son comúnmente usadas en Estados Unidos, Australia y África del Sur (Bhuvaneshwari *et al.,* 2007).

Es importante señalar que para cualquier método los especímenes de suelo deben ser mantenidos y ensayados con su contenido natural de humedad, ya que el secado, especialmente al horno puede alterar las características dispersivas (Sayehvand & Dehghani, 2014).

Pruebas físicas

Prueba de Crumb

La prueba de Crumb (antes llamada Prueba de coherencia agregada) desarrollada por Emerson en 1967, es un ensaye efectivo y rápido para identificar la dispersividad del suelo en campo y en laboratorio, aunque tiene ciertas limitaciones.

Kinney (1979) observó que no todos los suelos muestran reacción de dispersividad por esta prueba, tal es el caso de los suelos que contienen caolinita, del cual se conoce que presenta problemas de dispersividad en campo, a pesar de esto, si el ensaye indica dispersión, el suelo probablemente será dispersivo. Además, no es aplicable a suelos con 12 % o menos partículas que pasan los 0.005 mm y tengan un índice de plasticidad menor o igual a 8.

Este ensaye puede realizarse tanto como para muestras inalteradas (Método A-Procedimiento para muestras de Suelo Natural) y muestras alteradas (Método B-Procedimiento para muestras de Suelo Remoldado) (ASTM D6572-06, n.d.). Consiste en preparar un espécimen cúbico de 15 ± 5 mm de cada lado y cuidadosamente colocarlo en el fondo de un recipiente que contenga 250 ml de agua destilada. La dispersión es obtenida mediante la observación del comportamiento de la reacción del suelo al entrar en contacto directo con el agua, debido a que este comienza a hidratarse y sus partículas de tamaño coloidal tienden a deflocularse y entrar en suspensión (Alabdullah *et al.,* 2022).

De acuerdo con lo anterior, la dispersión puede ser catalogada en 4 grados siguiendo las pautas mencionadas en la Norma ASTM D 6572-06 (n.d.):

Grado 1 (no dispersivo): Sin reacción, el suelo puede desmoronarse y esparcirse, pero no se presenta turbidez por coloides suspendidos en el agua.

Grado 2 (Intermedio): Reacción ligera, se considera como grado de transición. Una suspensión coloidal tenue apenas visible que provoca turbidez cerca de la superficie de la muestra de suelo.

Grado 3 (Dispersivo): Reacción moderada, se observa fácilmente una nube de coloides en suspensión fuera de la superficie de la muestra de suelo que puede extenderse hasta 10 mm de la masa de la muestra a lo largo de la parte inferior del recipiente.

Grado 4 (Altamente Dispersivo): Reacción fuerte, se observa una nube densa y profusa de coloides suspendidos completamente alrededor del fondo del recipiente. La dispersión es tan extensa que es difícil determinar la interfaz de la muestra de suelo original y la suspensión coloidal. En casos extremos toda el agua se vuelve demasiado turbia.

Prueba del agujero Pinhole

Sherard *et al.* en 1976, desarrollaron esta prueba de laboratorio para medir el potencial de erosión/dispersividad en muestras de suelo compactadas, simulando la acción del flujo de agua a través de tuberías/grietas en el suelo (Maharaj & Green, 2015).

El ensaye consiste en dejar fluir agua destilada a través de un orificio de 1.00 mm de diámetro perforado en una muestra de suelo compactada a un determinado gradiente hidráulico (H) de 50, 180, 380 y 1020 mm. La resistencia a la erosión se determina visualmente por la presencia o ausencia de turbidez del agua que emerge, la medición de las velocidades del flujo y el diámetro final del orificio (Shogui *et al.*, 2013). Si el orificio se erosiona rápidamente y el agua se vuelve turbia, el suelo es dispersivo. Si no hay erosión y el agua se mantiene clara se considerará no dispersivo.

La norma ASTM D 4647-93 (n.d.) indica tres métodos alternativos para clasificar la dispersividad de las arcillas:

Método A:

D1, D2 (Dispersivo): La muestra de suelo falla rápidamente por debajo de un gradiente hidráulico de 50 mm.

ND4, ND3 (Dispersión ligera y/o moderada): La muestra de suelo se erosiona lentamente por debajo de un gradiente hidráulico de 50 o 180 mm.

ND2, ND1 (No dispersivo): La muestra de suelo presenta ligera o nula erosión coloidal debajo de los gradientes hidráulicos de 380 o 1020 mm.

Método B:

D (Dispersivo): La muestra de suelo falla rápidamente por debajo de un gradiente hidráulico de 50 mm.

SD (Dispersión ligera): La muestra de suelo se erosiona lentamente por debajo de un gradiente hidráulico de 180 mm.

ND (No Dispersivo): La muestra de suelo presenta muy ligera o nula erosión coloidal debajo de un gradiente hidráulico de 380 mm.

Método C:

D1, D2 (Dispersivo): La muestra de suelo falla rápidamente por debajo de un gradiente hidráulico de 50 mm.

ND4, ND3 (Dispersivo): La muestra de suelo se erosiona lentamente por debajo de un gradiente hidráulico de 50, 180 o 380 mm.

ND2, ND1 (No Dispersivo): La muestra de suelo presenta muy ligera o nula erosión coloidal debajo de un gradiente hidráulico de 380 mm

En el método A y C es necesaria la evaluación de la turbidez del agua que emerge, el tamaño final del orificio y la velocidad del flujo para poder clasificar las características dispersivas del suelo. El método B solo requiere la evaluación de la turbidez del agua que emerge y el tamaño final del orificio para poder clasificar las características dispersivas del suelo (Shogui *et al.*, 2013), estos últimos dos factores son considerados los más importantes cuando la prueba se desarrolla en muestras inalteradas.

Se pueden obtener resultados similares en todos los métodos, por lo que cualquiera de ellos puede ser utilizado para clasificar la dispersividad de las arcillas. El criterio de evaluación de los métodos se resume en la Tabla 2 y Figura 1.

Sin embargo, este ensaye no es aplicable para suelos con menos de 12 % de partículas que pasan los 0.005 mm y que tengan un índice de plasticidad menor o igual a 4 debido a que dichos suelos presentan poca resistencia a la erosión sin importar sus características dispersivas (ASTM D4647-93, n.d.).

Tabla 2. Criterio de evaluación de los resultados de la prueba Pinhole por el Método A y B (ASTM D4647-93, n.d.)

Grado de dispersión	Cargas de presión estática (mm)	Tiempo de Prueba por carga (min)	Velocidad final del flujo a través del espécimen mL/s	Turbidez del flujo al final de la prueba		Ancho del orificio después de la prueba (mm)
				Lateral	Parte superior	
D1	50	5	1.00 - 1.40	Oscuro	Muy oscuro	≥ 2.00
D2	50	10	1.00 - 1.40	Mod. oscuro	Oscuro	> 1.50
ND4	50	10	0.80 - 1.00	Lig. oscuro	Mod. oscuro	≤ 1.50
ND3	180	5	1.40 - 2.70	Muy poco visible	Lig. oscuro	≥ 1.50
	380	5	1.80 - 3.20			
ND2	1020	5	> 3.00	Claro	Muy poco	< 1.50
ND1		5	≤ 3.00	Perfectamente claro	Perfectamente claro	1.00
Método B						
D	50	10	…	Lig. oscuro a oscuro	Muy oscuro a Mod. oscuro	≥ 1.50
SD	180-380	5	…	Muy poco visible	Lig. oscuro	≥ 1.50
ND	380	5	…	Claro	Muy poco visible a claro	< 1.50

Mod: Moderadamente, Lig: ligeramente

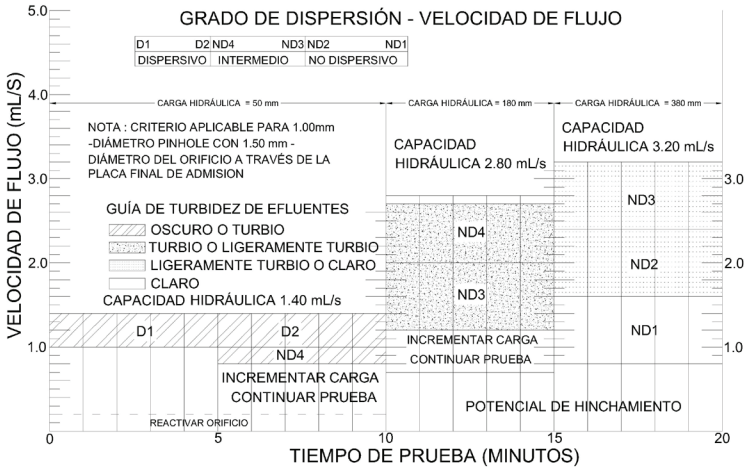

Figura 1. Criterio de evaluación de los resultados de la prueba Pinhole por el Método C (ASTM D4647-93, n.d.)

Prueba del doble hidrómetro

La prueba del Doble Hidrómetro, también conocida como el ensaye del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) o ensaye de Dispersión en Porcentaje fue desarrollado por Volk G. M. en 1937 (Volk, 1938). Es uno de los ensayes más empleados para determinar el potencial de dispersión de los suelos. Consiste en determinar de manera conjunta la distribución de tamaño de partícula utilizando dos hidrómetros. En uno de los hidrómetros se sigue la prueba estándar de granulometría por hidrómetro de la norma ASTM D4221-99 (n.d.), donde la muestra de suelo se mezcla en agua destilada con un agente defloculante; mientras que en el otro hidrómetro se realiza sin agitación mecánica y sin agregar agente defloculante (Maharaj & Green, 2013).

El porcentaje de dispersión se calcula por medio de la Ec. (1), dividiendo el porcentaje de partículas de 0.005 mm de diámetro, resultado obtenido en el hidrómetro sin defloculante entre el obtenido en el ensaye estándar de granulometría por hidrómetro (ASTM D4221-99, n.d.):

$$\%\ Dispersión = \frac{\%que\ pasa\ 5-\mu m\ en\ esta\ prueba}{\%que\ pasa < 5-\mu m\ por\ el\ método\ de\ la\ prueba\ D422} \quad (1)$$

Sherard *et al*. (1976), citado por Garay-Porteros Hilda y Alva-Hurtado Jorge E. (Garay & Alva, 1999), determinaron el criterio de evaluación para los resultados de los suelos ensayados por esta prueba donde indican que los suelos susceptibles a la dispersión y a las fallas de tubificación presentan un porcentaje de dispersión mayor que 50 %, mientras que los suelos que no son susceptibles presentan resultados menores que el 15 %. El criterio de evaluación del porcentaje de dispersión se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterio de evaluación de los resultados de la Prueba del Doble Hidrómetro (Garay & Alva, 1999)

Grado de dispersión	Porcentaje de dispersión
No dispersivo	< 30%
Intermedio	30 % - 50 %
Dispersivo	> 50 %

Esta prueba es solo aplicable a suelos con un índice de plasticidad mayor a 4 y que contengan más de 12 % de partículas que pasan 0.005 mm. Si la prueba la realiza varias veces el mismo operador con el mismo equipo y se obtienen resultados distintos, no debe ser considerado como sospechoso a menos que difiera más de 11.10 % de su media (ASTM D4221-99, n.d.).

Pruebas químicas

Prueba de Porcentaje de Sodio Intercambiable (ESP)

Es la técnica analítica frecuentemente utilizada para determinar el potencial de dispersión del suelo. Para obtener el parámetro ESP es necesario tener la Capacidad de Intercambio de Cationes del suelo (CEC) y el sodio intercambiable (Na^+) medido en miliequivalentes en una muestra de 100 gr (meq/100g) (Sayehvand & Dehghani, 2014; Siosemarde *et al*., 2010). Está definido por la Ec. (2):

$$ESP = \left(\frac{Na^+}{CEC}\right)x100 = \left(\frac{Na^+}{Na^+ + Mg^{2+} + K^+ + Ca^{2+}}\right)X100 \quad (2)$$

El criterio utilizado para clasificar los suelos dispersivos por medio del parámetro ESP se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Criterio para clasificar suelos dispersivos usando el parámetro ESP (Knodel, 1991)

ESP	Grado de Dispersión
< 7	No Dispersivo
7 - 10	Intermedio
> 10	Dispersivo

Relación de Absorción de Sodio (SAR)

El SAR es otro parámetro comúnmente evaluado para cuantificar el papel del sodio respecto a la dispersión, cuando sales libres están presentes (Knodel, 1991). Se define por la Ec. (3):

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{0.50(Ca^{2+} + Mg^{2+})}} \quad (3)$$

Donde las cantidades de cationes de Sodio, Calcio y Magnesio (Na^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}), que se encuentran contenidos en el agua de poro, son expresados en meq/L.

La aplicación del parámetro SAR en la identificación de suelos dispersivos se ve limitada, ya que no es aplicable si no existen suficientes cationes libres en el agua de los poros, lo cual se presenta comúnmente en las arcillas dispersivas, cuyos cationes de sodio están adheridos a la doble capa de difusión de las partículas (Glez & Novoa, 2008).

Se ha demostrado que los suelos son dispersivos si el SAR excede el valor de 2. Esto muestra una razonable

relación para los suelos con valores de sales totales disueltas (TDS) entre 0.50 y 3.0 meq/L, pero no para suelos fuera de este rango como se muestra en la Figura 2 (Knodel, 1991).

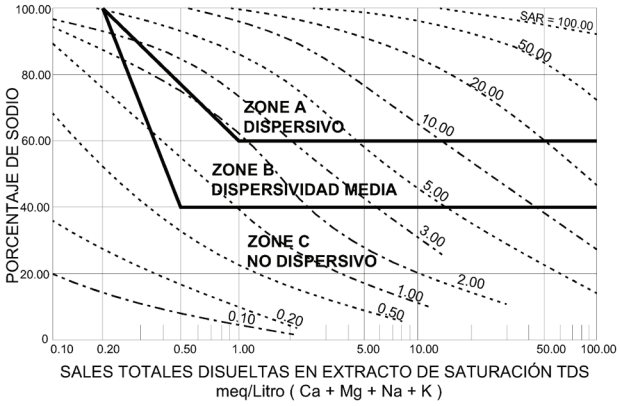

Figura 2. SAR superpuesto sobre el cuadro TDS (Knodel, 1991)

Método químico de Sherard

Es el método actual para evaluar la influencia química en el comportamiento dispersivo. Ha sido elaborado a partir de observar que el fenómeno de dispersión de la arcilla es químico y la tendencia a la erosión depende de sus propiedades químicas de sales disueltas en el agua de poro. Si se realiza una precisa y correcta interpretación de los resultados de las pruebas químicas se debe obtener una evaluación fiable de la dispersividad del suelo (Ingles *et al.*, 1970)..

De acuerdo con este método, el potencial de dispersión es evaluado respecto al tipo y cantidad de cationes presentes en el agua de poro de la muestra de suelo. Para este objetivo, un extracto de saturación se prepara de la muestra de suelo, así sus cuatro principales cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio) son determinados en términos de miliequivalentes por litro y la cantidad total de sales disueltas (TDS), así como el porcentaje de sodio (PS) son calculados por la Ec. (4) (Shogui *et al.*, 2013):

$$Porcentaje\ de\ Sodio\ (PS) = \frac{Na^+}{Sales\ totales\ Disueltos} x100 = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \quad (4)$$

Este método se realiza siguiendo los procesos establecidos en la publicación del Departamento de Agricultura de Estados Unidos llamada "Diagnóstico y Mejora de Suelos Salinos y Alcalinos" (Richards, 1954).

La Figura 3 ha sido empleada con éxito en Estados Unidos, donde los datos preliminares de suelos de un área determinada demuestran una buena correlación entre el cuadro de la Figura 3 y el ensaye Pinhole. Sin embargo, no fue acertado para suelos ensayados en el Sur de África y Zimbabwe. Por esta razón se desarrolló un procedimiento para evaluar los efectos de las sales disueltas en el agua de poro sobre el potencial de dispersión, como se muestra en la Figura 4 (Knodel, 1991), aunque a la fecha no ha sido ampliamente usado en Estados Unidos y no se han desarrollado estudios correlativos.

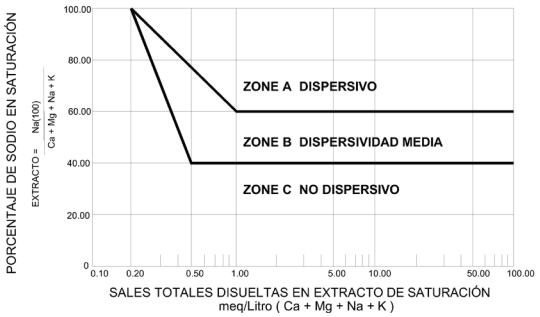

Figura 3. Criterio de evaluación de Potencial dispersivo contra TDS (Knodel, 1991)

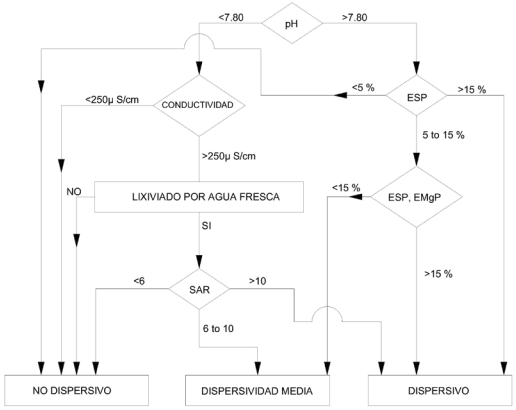

Figura 4. Diagrama de flujo para evaluar el Potencial Dispersivo mediante análisis químico (Knodel, 1991)

Estabilización química de suelos dispersivos

En el pasado, el uso de los suelos dispersivos en la ingeniería civil no era muy recomendado. Sin embargo, el crecimiento urbano en las últimas décadas ha incrementado la demanda de vivienda, vías de comunicación, servicios básicos y otros tipos de infraestructura, surgiendo la necesidad de utilizar las zonas con presencia de este material.

Para lograr este objetivo se han desarrollado métodos para reducir o eliminar esta propiedad perjudicial

https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.018

del suelo, siendo el más utilizado la estabilización química, que consiste en agregar algún aditivo químico al suelo con la finalidad de formar enlaces con los minerales de la arcilla presentes.

La estabilización química del suelo permite obtener mejores propiedades físicas, químicas y mecánicas en relación con las condiciones medioambientales de servicio. Los aditivos químicos comúnmente utilizados son: Sulfato de aluminio, puzolanas, cenizas volcánicas, zeolita micronizada, cemento portland y cal.

Resultados y discusión

Jafari *et. al.,* en el 2012, evaluaron la estabilización de un suelo dispersivo ubicado en la provincia de Zanjan al noroeste de Irán, aplicando Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$). La evaluación de la dispersividad del suelo la realizaron mediante la prueba del Doble Hidrómetro y análisis químico. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

El material ensayado por la prueba del doble hidrómetro se considera dispersivo al contar con un porcentaje de dispersión mayor a 50 %. Con el análisis químico, aplicando la Ec. (4) se obtiene que el porcentaje de sodio del suelo es igual a 75.09 %. Utilizando el gráfico de la Figura 2, para los valores de PS y TDS calculados se obtiene que el suelo queda localizado en la zona A confirmando que es dispersivo.

La finalidad de agregar sulfato de aluminio al suelo es que, durante el intercambio de iones en la reacción como se muestra en la Ec. (5), el catión trivalente de aluminio (Al^{3+}) reemplace al catión de sodio (Na^{+}). En tal intercambio, la estructura del suelo es cambiada de dispersa a estado condensado debido a que las fuerzas de repulsión y el potencial de dispersión es reducido (Jafari *et al.,* 2012).

$$Al_2(SO_4)_3 + ARCILLA \Rightarrow AL[ARCILLA] + 3\,(H_2SO_4) \quad (5)$$

En la Figura 5 se observa que el material presenta una reducción de 32 % del porcentaje de dispersión con la adición de 0.60 % de sulfato de aluminio y al incrementar el porcentaje hasta un 3 %, el material comienza a comportarse en su totalidad como suelo no dispersivo.

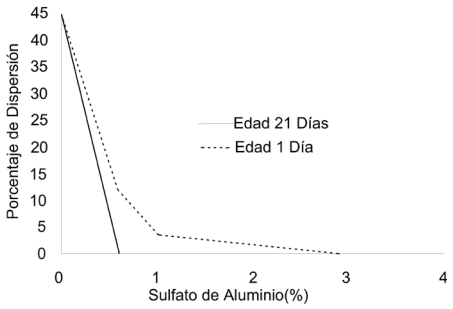

Figura 5. Resultados de la prueba de doble hidrómetro para evaluar los porcentajes de Dispersión para tiempos de curado de 1 y 21 días respecto al porcentaje de aluminio usado (Jafari *et al.,* 2012)

Vakili *et. al.,* en el 2013, evaluaron la estabilización de un suelo dispersivo ubicado en Boordouzi, Azarbayejan en Irán, aplicando material puzolánico de contenido silíceo. La evaluación de la dispersividad del material la realizaron mediante un análisis químico cuyos resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5. Propiedades dispersivas y químicas del suelo encontrado en la provincia de Zanjan, Noroeste de Irán (Jafari *et al.,* 2012)

Propiedades dispersivas del suelo usado		
Clasificación basada en Prueba Pinhole	Clasificación basada en Prueba del Doble Hidrómetro	Porcentaje de dispersión en Prueba del Doble Hidrómetro
Totalmente Dispersivo D1	Totalmente Dispersivo	59.20

Propiedades Químicas del suelo usado								
SO_4^{2-} meq/L	Cl^- meq/L	TDS %	EC ms/cm	Mg^{2+} meq/L	Ca^{2+} meq/L	K^+ meq/L	Na^+ meq/L	pH
38.90	10.22	0.60	96.00	13.90	34.80	9.00	174.30	7.20

Tabla 6. Propiedades químicas del suelo encontrado en Boordouzi, Azarbayejan, Irán (Vakili *et al.*, 2013)

Propiedades químicas de la muestra de suelo dispersivo		
Propiedad	Unidad	Valor
pH		8.50
Na^{+}	meq/L	179.16
K^{+}	meq/L	16.89
Ca^{2+}	meq/L	21.25
Mg^{2+}	meq/L	13.15
Conductividad Eléctrica	meq/L	20.90
Sales Totales Disueltas	meq/L	230.45
Relación de Absorción de Sodio	meq/L	43.20
Porcentaje de Sodio	%	78.00

Utilizando el gráfico de la Figura 2, para los valores de PS y TDS del análisis químico se obtiene que el suelo queda localizado en la zona A, catalogándolo, como dispersivo. El material puzolánico lo agregaron en distintos porcentajes al suelo y realizaron la evaluación de la dispersión mediante la prueba de Pinhole. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.

Vakili *et al.* (2013), obtuvieron una reducción de 25.79 % de porcentaje de dispersión agregando 5 % de puzolana a 90 días de curado

Savaş *et al.* (2018), evaluaron la estabilización de suelo dispersivo encontrado en la región central de Anatolia en Turquía, usando cenizas volcánicas tipo C y F. El estudio se realizó a dos muestras de suelo de sondeos diferentes, de los cuales se valoró la dispersividad utilizando análisis químico. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8.

Utilizando el gráfico de la Figura 2, para los valores de PS y TDS del análisis químico se obtiene que la muestra 1 queda localizada en la zona A, catalogándolo como altamente dispersivo, mientras que la muestra 2 queda localizada en la zona C con una dispersión intermedia.

Al realizar la mezcla del suelo con las cenizas volcánicas tipo C y F se determinó la dispersión utilizando la prueba de Pinhole y de Crumb. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9.

Tabla 7. Determinación del grado de dispersión del suelo mezclado con el material puzolánico silíceo en diferentes tiempos de curado (Vakili *et al.*, 2013)

Muestra	Día 1	Día 7	Día 14	Día 35	Día 90
P = 2 %	D2	D2	ND4	ND3	ND3
P = 4 %	ND4	ND4	ND4	ND3	ND3
P = 6 %	ND3	ND3	ND3	ND3	ND2
P = 8 %	ND4	ND4	ND3	ND3	ND3
	D2	ND4	ND3	ND3	ND3

D2 = Dispersivo, ND2 = No Dispersivo, ND3, ND4 = Dispersividad Media

Tabla 8. Propiedades químicas del suelo en estudio ubicado en Anatolia, Turquía (Savaş *et al.*, 2018)

Muestra	Conductividad	pH	TDS	PS	SAR	ESP
	mmhos/cm		meq/L	%	meq/L	%
1	9.94	9.05	72.25	95.42	55.95	47.26
2	1.154	8.35	10.45	46.79	3.96	7.29

https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.018

Tabla 9. Resultado de dispersión obtenida al mezclar diferentes porcentajes de cenizas volcánicas tipo C y F con el suelo en estudio ubicado en Anatolia, Turquía (Savaş *et al.*, 2018)

Contenido de aditivo	Muestra 1				Muestra 2			
	Clase C		Clase F		Clase C		Clase F	
(%)	Prueba Pinhole	Prueba de Crumb	Prueba Pinhole	Prueba de Crumb	Prueba Pinhole	Prueba de Crumb	Prueba Pinhole	Prueba de Crumb
0	D1	Grado 3	D1	Grado 3	ND4	Grado 1	ND4	Grado 1
5	ND3	Grado 2	D1	Grado 3	ND1	Grado 1	ND3	Grado 1
10	ND1	Grado 1	D1	Grado 3	ND1	Grado 1	ND4	Grado 1
15	ND1	Grado 1	D1	Grado 3	ND1	Grado 1	ND5	Grado 1
20	ND1	Grado 1	D1	Grado 3	ND1	Grado 1	ND6	Grado 1
25	ND1	Grado 1	D1	Grado 3	ND1	Grado 1	ND7	Grado 1
30	ND1	Grado 1	D1	Grado 3	ND1	Grado 1	ND3	Grado 1

En este estudio se obtuvo que la ceniza clase C es más efectiva para la estabilización de suelos dispersivos, ya que reduce el grado de dispersión de 3 a 1 utilizando un 10 % de aditivo, mientras que al utilizar la ceniza tipo F no se observa disminución de esta propiedad en el suelo.

Gidday & Mittal (2020) evaluaron la estabilización de un suelo dispersivo ubicado en el área de Arba Minch y Derashe Woreda, Etiopía, utilizando como aditivo cal. Las propiedades dispersivas del suelo en estudio se obtuvieron en 5 muestras de suelo de sondeos diferentes por medio de la prueba del Doble Hidrómetro y análisis químico. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Se observa que las muestras por medio de la prueba del doble hidrómetro tienen porcentajes de dispersión mayores a 50 %, lo que indica que son altamente dispersivos y de igual manera mediante el parámetro SAR se comprueba su dispersividad, ya que tiene valores mayores a 15 %.

Los resultados de la evaluación de la dispersividad con los distintos contenidos de cal se muestran en la Figura 6 y Tabla 11.

Tabla 10. Propiedades químicas del suelo en el área de Arba Minch y Derashe Woreda, Etiopía (Gidday & Mittal, 2020)

Descripción	Unidad	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
Prueba del doble hidrómetro	%	54.70	69.20	58.80	66.30	48.80
SAR	%	15.80	14.30	14.31	20.32	18.94
PS	%	62.11	67.65	67.44	70.10	61.60

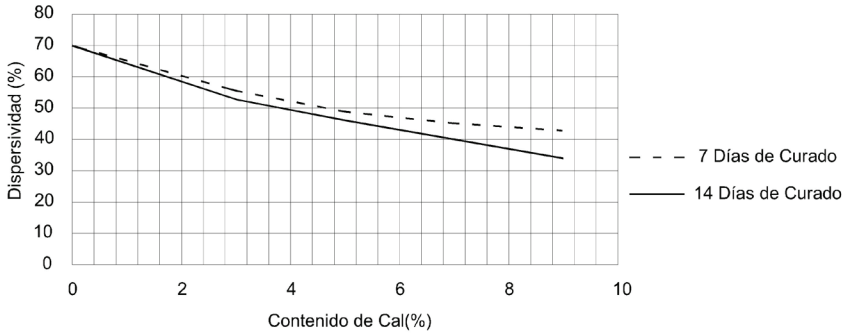

Figura 6. Resultado de la prueba del doble hidrómetro para la determinación del grado de dispersión del suelo mezclado con cal en tiempos de curado de 7 y 14 días (Gidday & Mittal, 2020)

Tabla 11. Influencia de la cal y tiempos de curado sobre la dispersión del suelo (Gidday & Mittal, 2020)

Contenido de Cal (%)	Pozo-2 (Suelo MH)		Pozo-4 (Suelo CH)	
	Periodo de curado		Periodo de curado	
	7 días	14 días	7 días	14 días
	Dispersión (%)		Dispersión (%)	
0	69.20	69.20	66.30	66.30
3	55.38	52.60	51.55	50.05
5	48.73	45.80	45.16	42.98
7	44.91	39.89	39.20	36.00
9	42.60	33.20	35.72	31.09

Se obtuvo de este estudio que el contenido de cal ideal para estabilizar el suelo ronda entre el 7 y 9 % presentando aproximadamente una reducción de la dispersión de 26.60 % a los 7 días de curado y de 36 % a los 14 días de curado.

Es importante señalar que el espesor de la capa activa y superficie a estabilizar utilizando alguna de las técnicas de estabilización revisadas en este artículo, dependerá de la ubicación y tipo de proyecto, ya que se deberá tener en consideración la magnitud de esfuerzos que se aplicarán y las condiciones climáticas de la región.

En cuanto al proceso constructivo para su aplicación podrá utilizarse procedimiento similar a los indicados en el manual de estabilización de suelo tratado con cal publicado por Nacional Lime Association (National Lime Association, 2004).

Conclusiones

El estudio de los suelos dispersivos a lo largo de la historia ha llevado a lograr tener una base de datos que sirven para conocer con claridad el fenómeno químico que ocurre en su estructura al entrar en contacto con el agua y los problemas que ocasionan en las obras civiles y así contar el día de hoy con pruebas de laboratorio estandarizadas que son utilizadas en todo el mundo.

Para un análisis preciso es recomendable la utilización simultánea de pruebas físicas y químicas, siendo las más utilizadas la prueba de Pinhole, Doble hidrómetro y la determinación de TDS y PS. Sin embargo, por el tipo de equipos necesarios en estas pruebas de laboratorio impide poder realizarlas en campo, además de que su tiempo de ejecución es relativamente largo, dando como lugar a que la prueba de Crumb sea la prueba índice más rápida y práctica para realizar en campo, pero no se deben tomar decisiones solamente con resultados de esta prueba.

A partir de los estudios que se han realizado se puede deducir que, en los suelos dispersivos estabilizados, sus propiedades evolucionan favorablemente con el tiempo y por el contrario su grado de dispersión se va reduciendo. El aditivo que da mejores resultados es el Sulfato de aluminio, ya que solo se necesita agregar un 3 % para eliminar la dispersión en su totalidad en el primer día de curado, seguido de la cal que con 7 a 9 % reduce 26.60 % y 36.00 % de la dispersión en los días 7 y 14 de curado, respectivamente, y por último está la puzolana que con un 5 % reduce la dispersión en 25.79 % en 90 días de curado.

Sin embargo, para poder determinar cuál aditivo es el más recomendable a utilizar en una obra civil, se debe realizar una evaluación económica y obtener una relación costo-beneficio, ya que de manera general todos los compuestos cumplen con el objetivo de reducir el grado de dispersión del suelo.

Para determinar el espesor de la capa activa y superficie a estabilizar quedará a criterio del ingeniero geotécnico, el cual deberá considerar la magnitud de los esfuerzos y condiciones climáticas a las que estará sujeto el proyecto.

De los estudios realizados se puede observar una tendencia a seguir mejorando las propiedades del suelo conforme va pasando el tiempo, por lo cual se puede plantear la hipótesis de que la reducción en el porcentaje de dispersión del suelo irá en aumento.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo económico brindado en concepto de beca de Maestría.

Referencias

Abbaslou, H., Hadifard, H., & Ghanizadeh, A. R. (2020). Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils. *In Heliyon*, 6(2). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03462

Abbaslou, H., Hadifard, H., & Poorgohardi, A. (2016). Characterization of dispersive problematic soils and engineering impro-

vements: A review. *Computations and Materials in Civil Engineering*, 1, 65-83.

Alabdullah, S. F. I., Hassab, Y., Teama, Z., & Aldahwi, S. (2022). Soil retention tests for determining dispersion of clayey soils. *International Journal of GEOMATE*, 22(93), 60-66. https://doi.org/10.21660/2022.93.3054

ASTM D4221-99. (n.d.). Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by Double Hydrometer. In ASTM International. PA West Conshohocken.

ASTM D4647-93. (n.d.). Standard test methods for identification and classification of dispersive clay soils by the Pinhole Test. In ASTM International. PA West Conshohocken.

ASTM D6572-06. (n.d.). Standard test method for determining dispersive characteristics of clayey Soils by Crumb Test. In ASTM International. PA West Conshohocken.

Bhuvaneshwari, S., Soundra, B., Robinson, R. G., & Gandhi, S. R. (2007). Stabilization and microstructural modification of dispersive clayey soils. 1st International Conference on Soil and Rock Engineering, Srilankan Geotechnical Society, Columbo, Srilanka, 1-7.

Djoković, K., Caki, l., Sušić, N., & Hadži, G. (2018). Methods for assessment and identification of dispersive soils. *ce/papers*, 2(2-3), 205-210. https://doi.org/10.1002/cepa.672

Garay, H., & Alva, J. E. (1999). Identificación y ensayos en suelos dispersivos. In XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil 1, 12.

Gidday, B. G., & Mittal, S. (2020). Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime. *Heliyon*, 6(2), e03384. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03384

Glez, Y., & Novoa, R. (2008). Identificación y estabilización de suelos dispersivos: Estado del Arte.

Holmgren, G., & Flanagan, C. (1977). Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*, STP 623, 218-239. https://doi.org/10.1520/stp26990s

Ingles, O. G., Aitchison, G. D., & others. (1970). Soil-water disequilibrium as a cause of subsidence in natural soils and earth embankments. *Publ. Int. Ass. Sci. Hydrol.*, Symp. Tokyo, 89, 342-353.

Jafari, H. R., Rad, M. H., & Hassanlou, M. R. (2012). Evaluating chemical stabilization of dispersive clay by aluminum sulfate (alum). *World Applied Sciences Journal*, 18(5), 613-616. https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.05.2561

Kinney, J. L. (1979). Laboratory procedures for determining the dispersibility of clayey soils.

Knodel, P. C. (1991). Characteristics and problems of dispersive clay soils. Bureau of reclamations, denver office, research Al laboratory service division materials engineering branch, Report No. October.

Maharaj, A., & Green, P. P. (2015). The pinhole test for dispersive soil identification. *Engineering Geology for Society and Territory*, 5. Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation 1299-1303. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_248

Maharaj, A., & Paige, P. (2013). The SCS Double Hydrometer Test in dispersive soil identification. In 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013 1, 389-392.

McElroy, C. H. (1987). Using hydrated lime to control erosion of dispersive clays.

National Lime Association. (2004). Manual de estabilización de suelos tratados con cal.

Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, 78(2). LWW.

Savaş, H., Türköz, M., Seyrek, E., & Ünver, E. (2018). Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20). https://doi.org/10.1007/s12517-018-3976-6

Sayehvand, S., & Dehghani, M. (2014). Identification and management of dispersive soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19(Y), 9023-9033.

Sherard, J.L. & Decker, R. S. (1978). Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. A symposium presented at the ASTM 79th annual meeting, Chicago, 27 June-2 July 1976 . Sherad, J L; Decker, R S (editors) ASTM STP 623, 1977, 486P. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(2), A29. https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91727-8

Sherard, J. L., Steele, E. F., Decker, R. S., & Dunnigan, L. P. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(1), 69-85.

Shogui, H., Ghazavi, M., Kazemian, S., & Moayedi, H. (2013). A state of art review of dispersive soils : identification methods perspective. *European Journal of Scientific Research*, 107(3), 322-328.

Siosemarde, M., Kave, F., Pazira, E., Sedghi, H., & Ghaderi, S. J. (2010). Prediction of soil exchangeable sodium ratio based on soil sodium adsorption ratio. In World Academy of Science. *Engineering and Technology*, 46, 255-257.

Vakili, A. H., Selamat, M. R., Moayedi, H., & Amani, H. (2013). Stabilization of dispersive soils by pozzolan. In Forensic Engineering 2012: Gateway to a Better Tomorrow Proceedings of the 6th Congress on Forensic Engineering 726-735. https://doi.org/10.1061/9780784412640.077

Volk, G. M. (1938). The method of determination of degree of dispersion of the clay fraction of soils as used in investigation of abnormal characteristics of soils in region eight of the soil conservation service. *Soil Science Society of America Journal*, 2, 561-565.

Cómo citar:

García-Ezquivel, C. A., & Rojas-González, E. (2024). Revisión de casos de identificación y estabilización química de suelos dispersivos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25 (03), 1-12. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.018