

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS**  
**-IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO PARA IDENTIFICACIÓN Y**  
**CLASIFICACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS POR EL MÉTODO DE PINHOLE-**

**JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ TOVAR**

**JORGE ANDRÉS GÓMEZ GRANADOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2012**

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS**  
**-IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO PARA IDENTIFICACIÓN Y**  
**CLASIFICACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS POR EL MÉTODO DE PINHOLE-**

**JOSE LUIS HERNÁNDEZ TOVAR**  
**JORGE ANDRÉS GÓMEZ GRANADOS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de**

**Ingeniero Civil**

**Director:**

**Ing. Wilfredo del Toro**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2012**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios padre Dios Hijo y Dios Espíritu Santo por ponerme en este camino, por brindarme la sabiduría, entendimiento y discernimiento necesario para superar todos los obstáculos.

A mis padres y hermana quienes con sus consejos y actos formaron el carácter de la persona que soy. Gracias a todas sus palabras y apoyos pues sin ello no sería la misma persona.

Gracias a todos y cada uno de los miembros del equipo de baloncesto de la Universidad Industrial de Santander pues su formación y amistad fue de gran valor. A todos los profesores que se involucraron en mi formación académica, pues sin sus exigencias no sería un profesional UIS.

A mi compañero de proyecto por confiar en mí y por brindarme su amistad, a todos y cada uno de los compañeros que se vieron implicados en mi crecimiento personal.

A ti Laury por que me acompañaste a lo largo de casi toda mi carrera y que ahora no estas, por tus palabras por tus consejos por tu carácter por todas y cada uno de los momentos en que hubo alegrías y tristezas.

*José Luis Hernández Tovar*

*“La vida humana acontece sólo una vez y por eso nunca podremos averiguar cuáles de nuestras decisiones fueron correctas y cuáles fueron incorrectas. En la situación dada sólo hemos podido decidir una vez y no nos ha sido dada una segunda, una tercera, una cuarta vida para comparar las distintas decisiones.”*

*Milan Kundera*

## **AGRADECIMIENTOS**

La fe y el esfuerzo dedicados a lo largo de los años de estudio, son el fruto de la gente que creyó en mí apoyándome en cada momento, alcanzando su mano para no dejarme caer, para enseñarme a caminar o simplemente para caminar junto a mi.

Es por eso que este trabajo está dedicado a ellos, a los que me mostraron que para triunfar en la vida, no es importante llegar primero. Para los que me enseñaron que para triunfar simplemente hay que llegar, levantándose una y otra vez sin importar lo que costara. Para todos los que estuvieron junto a mí durante toda esta etapa de mi vida y para todos los que estuvieron poco tiempo, pero siempre brindándome su apoyo, cariño y respeto.

Infinitas gracias a... Mi hermosa señora Mamá! Mi ocurrente señor Papá! Mi extraño señor hermano! Mi familia! Mis amigos, Viviana! Claudia! Fabio! Beto! Balaguera! Jose David! Tatanita! Javier! Eliuth! Jesús! Edward! Paola! Carito! Laura M.! Y por supuesto, a mi amigo y compañero de proyecto!

*Jorge Andrés Gómez Granados*

*“El fracaso consiste en no persistir, en desanimarse después de un error, en no levantarse después de caer.”*

***Thomas Alva Edison***

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	16
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 Arcillas dispersivas .....	17
1.2 Propiedades químicas .....	18
1.3 Propiedades geológicas.....	19
1.4 Tipos de erosión .....	19
1.4.1 Tubificación .....	20
1.4.2 Erosión por lluvia.....	22
1.5 Identificación de arcillas dispersivas .....	23
1.5.1 Ensayos de campo usados para Identificación de arcillas dispersivas 25	
1.5.2 Ensayos de laboratorio usados para Identificación de arcillas dispersivas .....	27
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS SOBRE ARCILLAS DISPERSIVAS .....	34
2.1 Antecedentes mundiales.....	36
Australia - 1964 .....	36
Estados Unidos - 1972 .....	36
Tailandia – 1977 .....	38
Grecia – 1977 .....	39
Brasil - 1977 .....	39
Sur África - 1980 .....	41
Pakistán – 1985.....	42
Argentina - 2004.....	43
Turquía - 2011 .....	47
2.2 Antecedentes nacionales.....	48
Bogotá - 2005.....	48
Girón - 2005 .....	48

3. ENSAYO PINHOLE.....	50
3.1 Clasificación Método A. ....	50
3.2 Materiales. ....	50
3.3 Método y Procedimiento. ....	51
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	56
5. REFERENCIAS.....	57
6. ANEXOS .....	60

## LISTA DE IMÁGENES

<i>Figura 1. Proceso de dispersión .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2. Proceso de defloculación.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3. Tubificación regresiva.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4. Tubificación hidráulica .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5. Tubificación como pozos .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6. Proceso de formación de surcos .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7. Etapas en el desarrollo de una cárcava.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8. Ensayo de Crumb .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9. Porcentaje de dispersión determinado con el ensayo de doble hidrómetro – SCS .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10. Ensayo Pinhole.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 11. Porcentaje de sodio sobre total de sales de disueltas .....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12. Potencial dispersividad vs TDS .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13. Detalles de reparación en las presas.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 14. Elementos del laboratorio. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15. Compactación del Espécimen. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 16. Perforación del espécimen .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 17. Mallas y elementos de ajuste.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 18. Dispositivo Pinhole.....</i>	<i>54</i>

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación por doble hidrómetro</i>	29
<i>Tabla 2. Clasificación de dispersión ESP</i>	32
<i>Tabla 3. Sistema de clasificación para suelos dispersivos</i>	42
<i>Tabla 4. Tratamientos y dosis utilizadas</i>	46
<i>Tabla 5. Guía de Datos.</i>	68
<i>Tabla 6. Clasificación de suelo según el método de desarrollo.</i>	69

## LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXO A</i> .....	60
<i>ANEXO B</i> .....	70
<i>ANEXO C</i> .....	71
<i>ANEXO D</i> .....	72
<i>ANEXO E</i> .....	73

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS – IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO PARA IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS DISPERSIVOS POR EL MÉTODO DE PINHOLE–.\*

**AUTORES:** JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ TOVAR  
JORGE ANDRÉS GÓMEZ GRANADOS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Dispersión, Arcillas, Suelos dispersivos, Pinhole, Erosión, Tubificación, Estado del arte.

### DESCRIPCIÓN

Los suelos dispersivos son un particular tipo de suelos que se pueden encontrar en casi cualquier lugar del mundo, este presenta un inusual comportamiento cuando se encuentra saturado o en presencia de flujos de agua. Su estudio y métodos de caracterización son de gran importancia pues ayuda a la prevención de fallas ingenieriles.

A lo largo de este documento se encuentran las bases teóricas para caracterizar los suelos dispersivos, las formas de erosión que este puede sufrir, y los ensayos que se tienen tanto en campo como en laboratorio para la identificación de los mismos. Cuenta con antecedentes históricos de obras a nivel mundial en donde los suelos dispersivos jugaron un papel determinante durante y después de su construcción. También se encuentran algunos antecedentes en Colombia, pero debido a la poca documentación que se tiene de ellos no se encontró mayor información.

El mayor número de daños por suelos dispersivos se presentan en las obras de contención, y terraplenes y estructuras donde el agua siempre esta presente. Las experiencias de los autores en la literatura citada, indica que de los métodos para la identificación de suelos dispersivos, el ensayo Pinhole es el más acertado en el momento de clasificar el suelo. También señalan el hecho de que las demás pruebas para caracterizar estos suelos (crumb, doble hidrómetro, ESP y SAR) deben llevarse a cabo para mejores resultados. Por esto, se construye el dispositivo para llevar a cabo la prueba Pinhole y la elaboración de una guía de uso, dejando abierta la posibilidad para profundizar en la investigación de los suelos dispersivos.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civi Director Ing. MSc.Wilfredo del Toro

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY AND CHARACTERIZATION OF DISPERSIVE SOILS – IMPLEMENTATION OF TEST FOR IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF DISPERSIVE SOILS BY THE PINHOLE METHOD–.\*

**AUTHORS:** JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ TOVAR  
JORGE ANDRÉS GÓMEZ GRANADOS\*\*

**KEY WORDS:** Dispersion, Clays, Soils dispersive, Pinhole, erosion, piping, State of the art.

### DESCRIPTION

Dispersive Soils are particular types of soil that can be found all over. This particular soil presents unusual dispersive behavior when it is saturated or when it gets wet. Studies and methods of characterizations of soils are widely important to prevent engineering failures.

This paper comprises the theoretical foundations to characterize Dispersive Soils regarding types of erosion, and the field and laboratory testing in order to identify the soils. It is as well supported by historical background on world building works where Dispersive Soils played an important role before and after building. In addition to it, there are some works in Colombia that do not have enough theoretical support that is why there was not much information in this respect.

There is a significant sample of damages because of Dispersive Soils in retaining walls works, embankments and structures where water is present. According to some authors mentioned here, the most appropriate methods to classify Dispersive Soils is the Pinhole Testing Method. For better results, they also highlight the importance of using other and more testing methods (crumb, double hydrometer, ESP and SAR) to characterize these soils. For this, a Pinhole Method Device is developed with its User Guideline, raising the possibility of going into deep research of Dispersive Soils.

---

\* Degree project

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering, Civil Engineering School, Advisor Eng. MSc. Wilfredo del Toro

## INTRODUCCIÓN

La erosión de los suelos puede producirse por fenómenos de distinta naturaleza. Según Ghuman<sup>1</sup>, los mecanismos de erosión se pueden generar por fuerzas exteriores, al incrementarse la velocidad del fluido; o puede darse por degradación de las fuerzas internas, como la disolución química de cementos naturales o la dispersión de arcillas, continuando la erosión hasta que las fuerzas externas e internas se equilibren.

Es indiscutible la necesidad del estudio de los suelos como base para desarrollar cualquier proyecto ingenieril. Un correcto análisis de estos puede prevenir eventos posteriores, que bien pueden ser una pérdida de dinero por el mantenimiento extra requerido o un colapso total de la estructura que pueda desencadenar un hecho catastrófico.

La información dada en este documento, se enfoca en la erosión que se produce en suelos arcillosos debido al fenómeno denominado dispersión, característico de las zonas tropicales, con poco conocimiento y manejo en Colombia y del cuál se advierte en la NSR-10 (Norma Sismo Resistente Colombiana) en el capítulo H.9.2.5: “NO deben utilizarse por ningún motivo materiales identificados o sospechosos de ser dispersivos, como materia prima para rellenos o terraplenes, hasta tanto no se compruebe su naturaleza por medio de ensayos apropiados”.

En primer lugar, se pretende profundizar en el tema mediante un marco referencial que brinde los conocimientos básicos acerca de las arcillas dispersivas. En segundo lugar, se plantea un estado del arte en relación con los autores e instituciones que han abordado el tema, que permita resumir el conocimiento y las conclusiones adquiridas hasta hoy. Por último, se busca implementar el ensayo de Pinhole, como una herramienta para evaluar la dispersión de los suelos y como medida para promover el interés investigativo de la escuela de Ingeniería Civil.

---

<sup>1</sup> GHUMAN, O.S., ALLEN, R.L., Mc NEILL, R.L., Erosion, Corrective Maintenance, and Dispersive Clays, Proceedings American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 172-190.

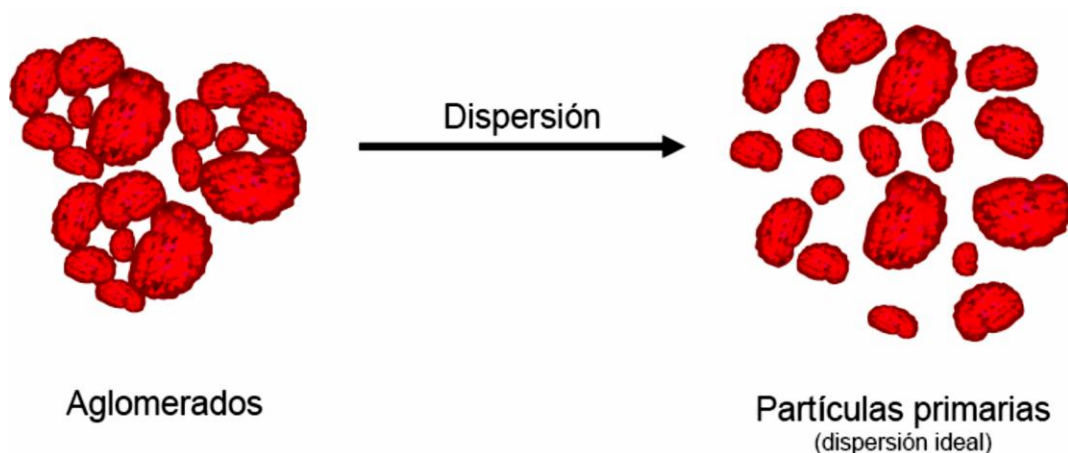
## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Arcillas dispersivas

Los suelos arcillosos se han considerado muy resistentes a la erosión debida a flujos de agua, sin embargo, se reconoce la existencia de suelos arcillosos altamente erosionables en la naturaleza. Algunos suelos de arcilla natural se dispersan en presencia de un flujo de agua relativamente puro, y por lo tanto, son altamente susceptibles a la erosión.

La tendencia a la erosión por dispersión en un suelo dado, depende de variables tales como la mineralogía y la química de la arcilla, así como las sales disueltas en el agua en los poros del suelo y en el flujo de agua erosionable. Tal flujo es de lento movimiento y erosiona rápidamente las arcillas, incluso más rápido en comparación con suelos no cohesivos, arenas finas y limos. Las placas de arcilla individuales son separadas y arrastradas por el flujo de agua. Esta erosión puede comenzar en una grieta seca, una hendidura por asentamiento, una fractura hidráulica u otro canal de alta permeabilidad en una masa de suelo.

**Figura 1. Proceso de dispersión**



*Fuente: Jaume, Figueras. Estabilidad de la dispersión, mecanismos y aditivos.*

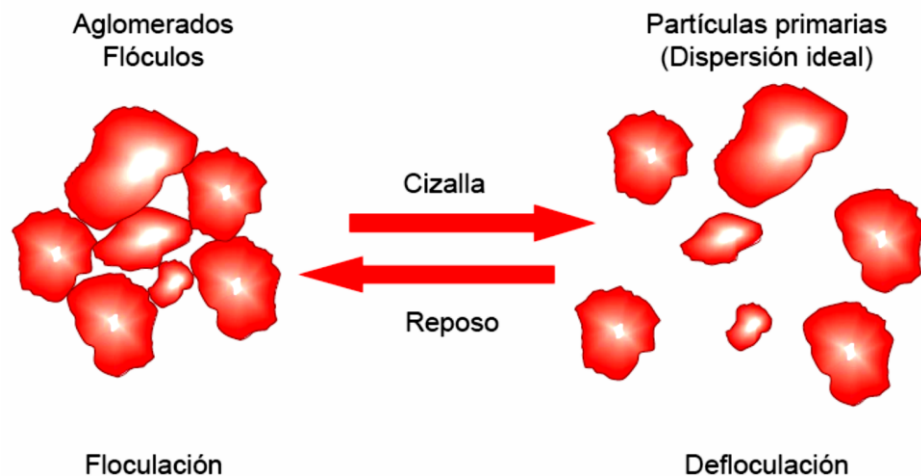
## 1.2 Propiedades químicas

La dispersión es un proceso por el cual las partículas de suelo (en este caso específico, de arcillas) de muy pequeñas dimensiones, ven disminuidas sus fuerzas de atracción molecular por efecto de la presencia de iones de Sodio, lo que las vuelve susceptibles al arrastre o la dilución.

Los suelos dispersivos incluyen solo esos suelos donde la fracción coloidal (partículas de arcilla menores a 0.2 micra) se deflocula y entra en dispersión. Esto como resultado de las fuerzas de repulsión (cargas eléctricas superficiales) entre las partículas de arcilla del suelo que exceden las fuerzas de atracción (fuerzas de Van Der Waals). Cuando esto ocurre los coloides se repelen unos a otros y se mueven dentro de la solución, donde permanecen en suspensión y la solución no esclarece con el tiempo.

Este fenómeno físico-químico de la repulsión de arcilla es la base de los suelos dispersivos, lo cuál constituye una causa particular en la formación de procesos de erosión.

**Figura 2. Proceso de defloculación**



*Fuente: Jaume, Figueras. Estabilidad de la dispersión, mecanismos y aditivos.*

### 1.3 Propiedades geológicas

Los suelos dispersivos son derivados de rocas con bajo calcio y magnesio, pero con un alto contenido de sodio, como la albita y la anfibolita. Elges<sup>2</sup> observó que la mayoría de los suelos dispersivos contienen Esmectita o Illita, con materiales de caolinita que generalmente son no dispersivos. El sodio en los suelos puede ser derivado del envejecimiento natural de ciertos tipos de rocas, de materiales depositados bajo condiciones marinas o salinas, o de disolución, filtración y deposición de sodio en el perfil de suelo, durante procesos geomorfológicos. Esto obviamente influye en el tipo y localización de sodio en el material.

Sherard<sup>3</sup>, señaló que la mayoría de las arcillas dispersivas encontradas por ellos, consistían en arcillas aluviales en forma de lavados<sup>4</sup> (slopewash), camas de depósitos lacustres, depósitos de loess<sup>5</sup> y depósitos de llanuras de inundación. También apuntó que algunas piedras de arcilla y esquistos depositados bajo condiciones marinas presentaban los mismos poros de aguas salinas que las arcillas dispersivas.

### 1.4 Tipos de erosión

La mayoría de los estudios documentados, han demostrado que las fallas de las estructuras construidas sobre suelos de arcilla dispersiva, están asociadas con la presencia de agua y de grietas generadas por las deficiencias de la contracción de la base de la presa, los asentamientos diferenciales o la construcción como tal. Estos fracasos enfatizan la importancia del reconocimiento temprano y la identificación de los suelos arcillosos de dispersión, de lo contrario, los problemas que causan pueden resultar en fallas repentinas, irreversibles y hasta catastróficas.

---

<sup>2</sup> ELGES, H.F.W.K. Dispersive soils. The Civil Engineer in South Africa, 1985, pp. 347-353.

<sup>3</sup> SHERARD, J.L., DUNNINGAN, L.P. & DECKER, R.S. Identification and nature of dispersive soils. Geotech Engng Div, ASCE, 1976, pp. 287-301.

<sup>4</sup> El Lavado o Slope Wash, es un proceso natural de importación de materiales hacia el suelo, gracias al agua de lluvia que las transporta desde la superficie.

<sup>5</sup> Depósitos de arcilla originados por la deposición de partículas transportadas por las tormentas de polvo a lo largo de miles de años.

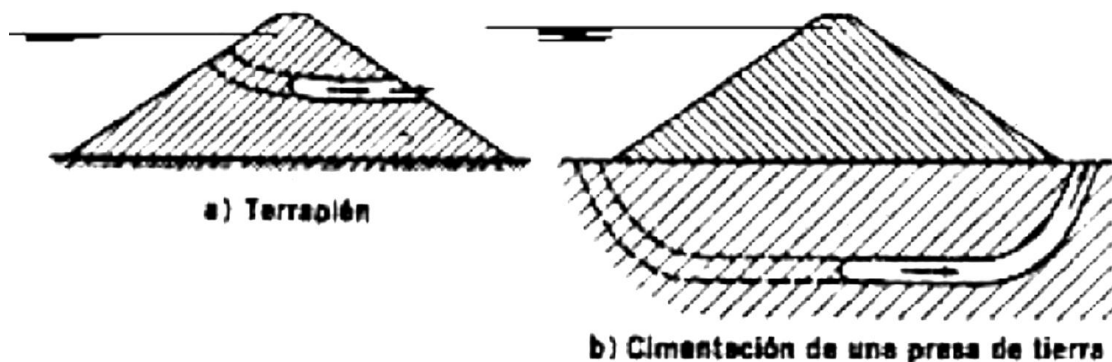
### 1.4.1 Tubificación

Este fenómeno se presenta cuando las fuerzas resistentes a la erosión son menores que las fuerzas del flujo de agua que tiende a producirla, de manera que las partículas son removidas y transportadas por la corriente. Este problema se puede iniciar en cualquier grieta (por pequeña que esta sea) producto de asentamientos diferenciales, sismos o grietas de tensión, incluso, a partir de orificios dejados por raíces o troncos podridos. La falla puede suceder desde el primer llenado o después de algún (o mucho) tiempo de haber sido finalizada la construcción. Para que esta falla se produzca, es inevitable que una grieta deba estar presente desde el inicio.

#### 1.4.1.1 Tubificación Retrógrada

Se puede producir prácticamente en todos los suelos, desde aguas abajo hacia aguas arriba, siguiendo preferentemente el camino de las líneas de filtración. El conducto se forma por las zonas geológicamente más débiles, por planos de estratificación permeable, o en cualquier otra zona de concentración de flujo donde la energía llegue sin sufrir pérdidas significativas debido a la fricción.

**Figura 3. Tubificación regresiva**

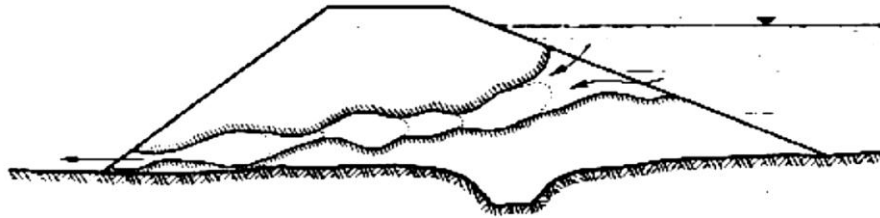


Fuente: Rayano, Manuel. Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra.

### 1.4.1.2 Fractura Hidráulica

Consiste en infiltración brusca del agua a través de las grietas de los terraplenes, bajo los efectos de la carga hidráulica, ejerciendo sub-presiones y presiones en todas direcciones.

**Figura 4. Tubificación hidráulica**

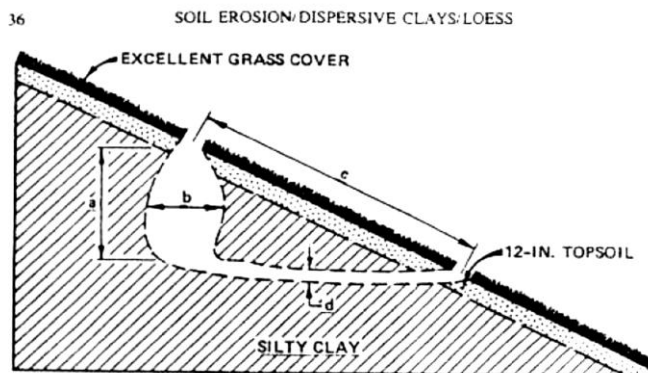


Fuente: Rayano, Manuel. Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra.

### 1.4.1.3 Pozos o sumideros

La morfología de los túneles, que al inicio son verticales y luego se desarrollan horizontalmente, sugieren la forma de “jarras” (sinkholes). Estos se producen porque el agua de lluvia penetra (y erosiona) por pequeñas fisuras abiertas por contracción o raíces de plantas.

**Figura 5. Tubificación como pozos**



Fuente: Rayano, Manuel. Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra.

Cuando una fuga de concentrados comienza a través de un terraplén construido con arcilla dispersiva, pueden darse dos acciones: si la velocidad es suficientemente baja, la arcilla que rodea el canal de flujo puede expandirse y progresivamente sellar la fuga; si la velocidad inicial es lo suficientemente alta, las partículas de arcilla dispersiva se dejan llevar ampliando el canal de flujo a un ritmo más rápido de lo que se pudiera estar cerrando, debido a la expansión de las arcillas, lo que minimiza la acción de la tubificación progresiva.

#### **1.4.2 Erosión por lluvia**

La erosión laminar o de la superficie por la lluvia en suelos cohesivos a menudo ocurre junto a la erosión por dispersividad. El Slaking<sup>6</sup>, también puede ser un factor de erosión interna y por esto, es necesario nombrar otros tipos de erosión, tales como:

##### **1.4.2.1 Erosión en surcos**

Ocurre cuando el flujo superficial se concentra en pequeñas corrientes sobre una pendiente, generando erosión debida a la concentración del flujo, creando pequeños canales que inicialmente son imperceptibles, pero que se van volviendo cada vez más profundos. Cuando los surcos se hacen más profundos y más anchos se les clasifica como cárcavas. La profundidad de los canales de erosión es de menos de 30 cm para considerarse como surcos y más de 30 cm como cárcavas. Los surcos pueden eliminarse con rastrillado y siembra de vegetación (figura 6).

##### **1.4.2.2 Erosión en cárcavas**

Al profundizarse y ampliarse los surcos de erosión, estos se convierten en cárcavas. Las áreas más susceptibles a erosión en cárcavas son aquellas de topografía de alta pendiente y mantos de suelo de gran espesor y así mismo, las que contengan suelos dispersivos o altamente erosionables.

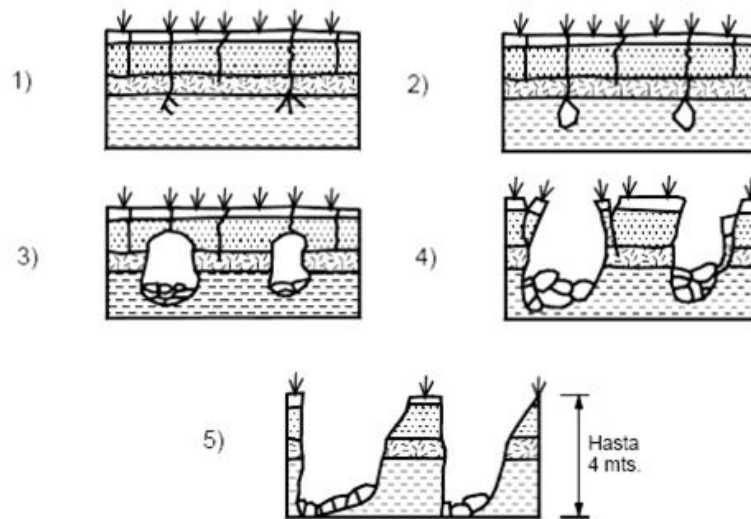
---

<sup>6</sup> Fenómeno de desagregación de la superficie del suelo, por una humectación rápida.

Las cárcavas son muy difíciles de estabilizar y controlar y para su estabilización se deben controlar tres partes:

- Erosión en el fondo
- Erosión lateral o ampliación de la cárcava
- Erosión en la cabeza o avance hacia arriba de la cárcava (figura 7).

**Figura 6.** *Proceso de formación de surcos*



*Fuente: Suarez Díaz, Jaime. Control de erosión en zonas tropicales.*

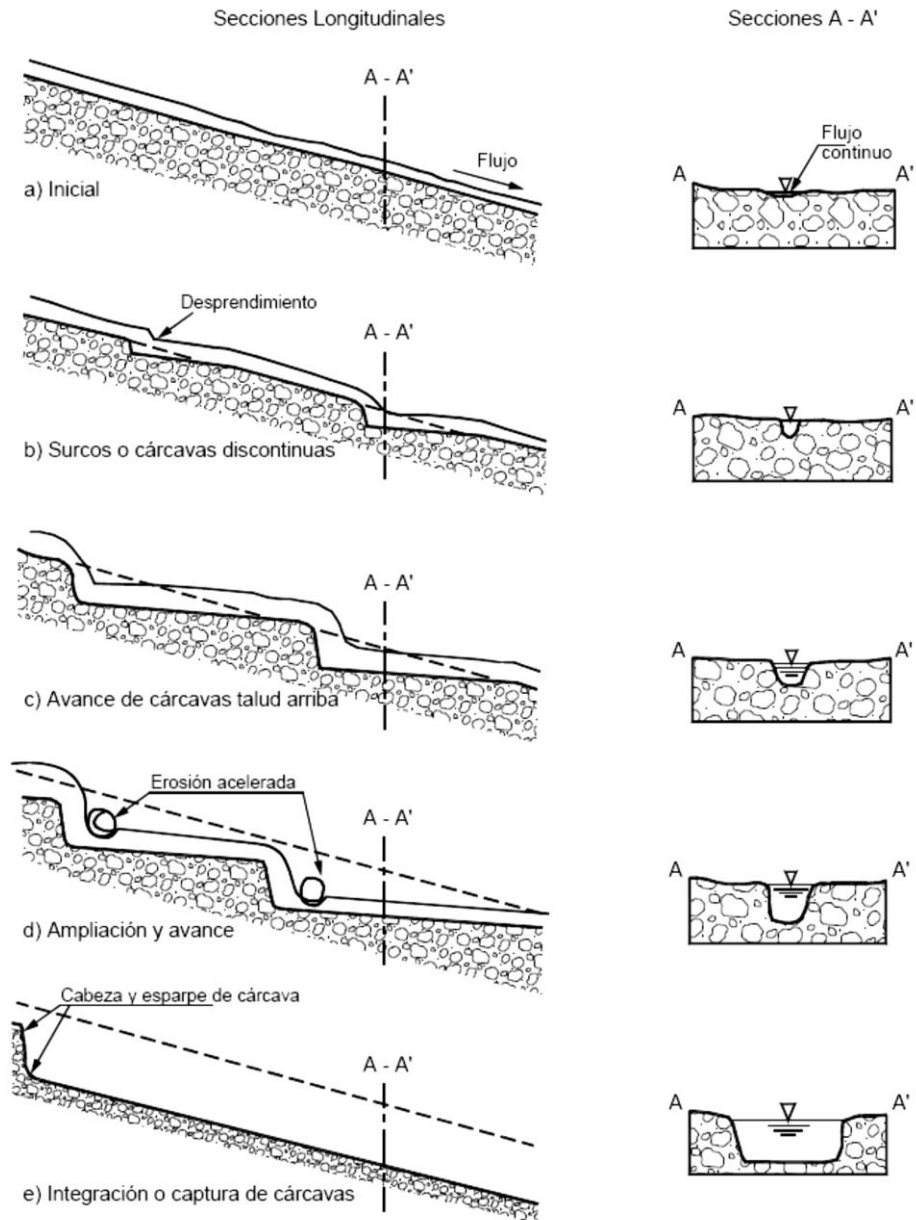
### 1.5 Identificación de arcillas dispersivas

La identificación de estos suelos debe comenzar con las exploraciones de reconocimiento en campo, para determinar si hay indicios que revelen dispersión en la superficie.

Algunos patrones que indican este fenómeno pueden ser aspectos inusuales de erosión, con túneles y profundos barrancos, coincidiendo con una turbidez excesiva en cualquier tipo de almacenamiento de agua. Zonas con escasa producción agrícola y retrasos en el crecimiento vegetativo también pueden indicar suelos altamente salinos muchos de los cuales son dispersivos. Sin embargo, los

suelos dispersivos también pueden presentarse en suelos neutros o ácidos y pueden apoyar el crecimiento exuberante de césped<sup>7</sup>.

**Figura 7. Etapas en el desarrollo de una cárcava**



Fuente: Suarez Díaz, Jaime. Control de erosión en zonas tropicales.

<sup>7</sup> ELGES, H.F.W.K., Problem Soils in South Africa -State of the Art, The Civil Engineer in South Africa, 1985, pp. 347-353.

A pesar que la evidencia en la superficie puede dar un claro índice, no descarta la presencia de arcillas dispersivas en la profundidad y por lo tanto es necesario continuar con las exploraciones en la zona.

Las arcillas dispersivas no pueden ser identificadas por la pruebas de índice estándar de laboratorio, como la clasificación visual, granulometría, peso específico o límites de Atterberg, porque se clasificarían erróneamente como una arcilla cualquiera, por lo tanto, es necesario implementar otro tipos de ensayos de laboratorio creados para este fin.

### **1.5.1 Ensayos de campo usados para Identificación de arcillas dispersivas**

Cuatro ensayos han sido usados para identificar arcillas dispersivas, el ensayo de Crumb (también usado en laboratorio), el ensayo de luz ultravioleta, el modificado hidrómetro o ensayo dilución-turbidez y la determinación de la correlación química del agua en los poros del suelo, usando el electrodo de sodio y reactivos químicos.

#### **1.5.1.1 *Ensayo de Crumb***

Fue desarrollado como un procedimiento sencillo para identificar el comportamiento dispersivo del suelo en el campo, pero ahora se utiliza a menudo en el laboratorio también.

La prueba consiste en la preparación de una muestra, ya sea cúbica, de 15 mm de lado sobre el contenido de agua natural o se selecciona una migaja del suelo de volumen más o menos igual. La muestra se coloca cuidadosamente en unos 250 ml de agua destilada. Como la miga del suelo comienza a hidratarse, la tendencia de las partículas de tamaño coloidal se defloculan y entran en suspensión.

Los resultados se interpretan a intervalos regulares de tiempo, distinguiendo cuatro grados de reacción:

- no hay reacción;
- leve reacción a reacción moderada, y
- una fuerte reacción (nube coloidal que cubre todo el fondo del recipiente).

Para evaluar el potencial de dispersión, se definen estos tres tipos de reacción:

- *Sin reacción:* La miga de suelo puede disgregarse e irse hasta el fondo del recipiente como una pila plana de material, pero no hay ningún signo de agua turbia causada por coloides en suspensión.
- *De leve a moderada reacción:* Hay una mera insinuación de una nube fácilmente reconocible de los coloides en suspensión. Los coloides de miga pueden estar sólo en la superficie o propagarse en delgadas líneas en la parte inferior del recipiente.
- *Fuerte reacción:* La nube coloidal cubre casi todo el fondo del vaso, generalmente en una capa muy delgada. En casos extremos, toda el agua en el recipiente se vuelve turbia.

Es usado a menudo como un complemento para otros ensayos de identificación de arcillas dispersivas. Sin embargo, este ensayo es un útil indicador solo en una dirección, pues si el ensayo indica dispersión, el suelo probablemente lo sea; no obstante muchos suelos dispersivos, particularmente los suelos que contienen caolinita, no reaccionan con el ensayo de Crumb.

#### **1.5.1.2** *El ensayo de luz ultravioleta*

Ha sido usado para indicar la presencia de sodio en el suelo. El acetato de uranilo es mezclado con los sólidos para observar la intensidad y cantidad de fluorescencia bajo luz ultravioleta, mostrando cerca de un 40% de confianza en la predicción de dispersividad.

#### **1.5.1.3** *El modificado hidrómetro o ensayo de dilución-turbidez*

Usado para identificar arcillas dispersivas en un área particular, correlacionándolo con otros ensayos de laboratorio para establecer un rango de valores. Por ejemplo, para un radio de turbidez menor que 4, la dispersión es un problema; para un radio de turbidez entre 4 y 9, la dispersión puede o no ocurrir; y para un radio de turbidez mayor que 9, no se presentará dispersión.

#### **1.5.1.4** *Correlación química de los poros con agua del suelo*

Dos métodos han sido usados para determinar esto en campo. El primer método incluye un electrodo de sodio y reactivos químicos para determinar el porcentaje de sodio y el total de cationes disueltos (calcio, magnesio y sodio). Este método no determina el potasio, el cual existe en pequeñas cantidades ( $< 1.0$  mEq/L) en la mayoría de los suelos. El segundo método, usa un puente de Wheatstone<sup>8</sup> para determinar el porcentaje de sodio y el total de cationes disueltos (calcio, magnesio, sodio y potasio).

#### **1.5.2** *Ensayos de laboratorio usados para Identificación de arcillas dispersivas*

Las cinco pruebas de laboratorio más relevantes y eficientes para identificar arcillas dispersivas son la prueba de Crumb, el ensayo de doble hidrómetro, el ensayo de Pinhole, el ESP (porcentaje de sodio intercambiable) y el SAR (Tasa de adsorción de sodio).

Es importante que todas las muestras de suelo se mantengan y se prueben con su contenido de agua natural, ya que el secado, especialmente el secado en el horno, puede alterar las características de dispersión.

Si bien varios de esos ensayos dan resultados consistentes para muchos suelos, hay un número significativo de excepciones. En consecuencia, sería prudente realizar las cinco pruebas en cada muestra de suelo.

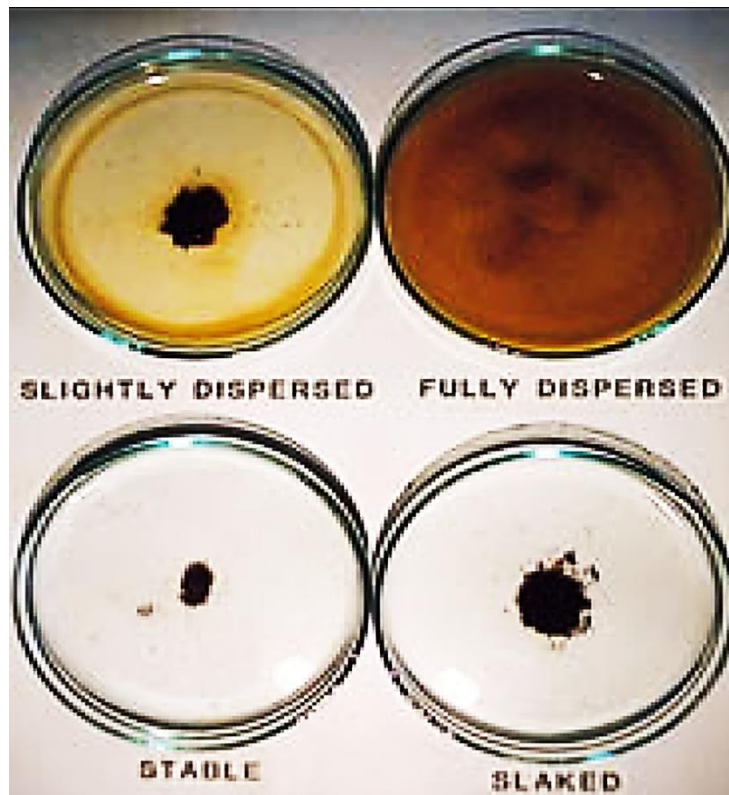
##### **1.5.2.1** *Ensayo de Crumb*

Usado tanto en campo como en Laboratorio (figura 8).

---

<sup>8</sup> Es un instrumento eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

**Figura 8. Ensayo de Crumb**



*Fuente: Garay Porteros, Hilda y Alva Hurtado, Jorge E. Identificación y ensayo en suelos dispersivos.*

#### **1.5.2.2 Ensayo de doble hidrómetro - SCS (Soil Conservation Service)**

También conocido como la prueba del doble hidrómetro, es uno de los primeros métodos desarrollados para evaluar la dispersión de los suelos arcillosos.

La muestra debe ser enviada al laboratorio en un recipiente hermético para evitar la pérdida de humedad. La prueba se realiza en muestras con contenido de agua natural. La distribución de tamaño de la partícula se determina primero con la prueba del hidrómetro estándar, en la que se dispersa la muestra de suelo en agua destilada con agitación mecánica fuerte y un dispersante químico. Una prueba del hidrómetro se hace en paralelo con un duplicado de la muestra de suelo, pero sin agitación mecánica y sin un dispersante químico.

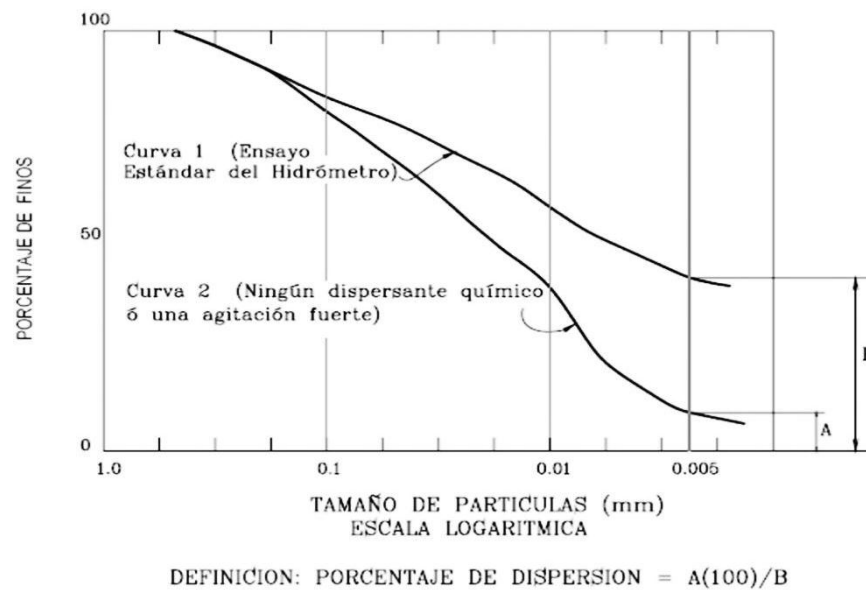
El "porcentaje de dispersión" es la relación entre la masa seca de partículas más pequeñas que 0.005 mm de diámetro, de la segunda prueba respecto a la primera expresada en porcentaje, como se muestra en la figura 9.

Los criterios para evaluar el grado de dispersión utilizando los resultados de la prueba del doble hidrómetro son:

**Tabla 1.** Clasificación por doble hidrómetro

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

**Figura 9.** Porcentaje de dispersión determinado con el ensayo de doble hidrómetro – SCS



Fuente: Garay Porteros, Hilda y Alva Hurtado, Jorge E. Identificación y ensayo en suelos dispersivos.

### **1.5.2.3** *Ensayo de Pinhole*

El ensayo de Pinhole fue desarrollado para medir directamente la capacidad de dispersión de un suelo de grano fino compactado, por el cual se hace fluir agua a través de un pequeño agujero hecho en la muestra de suelo, donde se simula el flujo de agua a través de una grieta u otro canal de fuga en el núcleo impermeable de una presa u otra estructura.

Un agujero de 1,0 mm de diámetro es perforado o taladrado a través de 25 mm de largo por 35 mm de diámetro de muestra cilíndrica de suelo. El agua destilada se hace fluir a través del agujero bajo las cabezas de 50, 180 y 380 mm (gradientes hidráulicos) registrando el caudal y la turbidez del flujo saliente. Las de 50, 180 y 380 mm arrojan velocidades de flujo que van de 30 a 160 cm/s (figura 10).

Es importante que la prueba sea hecha en suelos con contenido natural de agua, porque el secado puede afectar las características dispersivas de algunos suelos. Si el material contiene partículas de arena gruesa o grava, deberán ser eliminados mediante un tamiz de 2 mm (N<sup>o</sup> 10).

El contenido natural de agua debe ser determinado y se debe alcanzar la cantidad de humedad de compactación mediante la adición de la cantidad requerida de agua (o con un secado gradual al aire, si es demasiado húmedo). Toda el agua añadida deberá ser agua destilada.

Pese a que el ensayo de Pinhole es considerado como el más fiable, por ser una prueba física directa, se han observado dos limitaciones:

**1.5.2.3.1** Muestras inalteradas de suelo de alta sensibilidad que pueden ser clasificadas como dispersivas, mientras que en la naturaleza el suelo puede ser resistente a la erosión. Aparentemente, la estructura natural del suelo es destruida por el taladro de Pinhole en la muestra inalterada, produciendo una reacción análoga a la dispersión.

**1.5.2.3.2** Suelos con alto contenido de Sodio (más del 80%) y un bajo total de sólidos disueltos ( $< 0.4$  mEq/L) en los poros con agua del suelo pueden no presentar dispersividad, mientras que en campo el suelo puede ser totalmente dispersivo. Esto puede ocurrir por un decrecimiento en la concentración del gradiente entre los poros con agua del suelo y el flujo erosivo, proyectando así resultados con una decadencia en la tasa de dispersión.

**Figura 10.** *Ensayo Pinhole*



*Fuente: Suarez Zambrano, N.R. y Suarez Sanchez, J.A. Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos en la cuenca de la quebrada angulito en Girón.*

#### **1.5.2.4** *ESP (Porcentaje De Sodio Intercambiable)*

La presencia de sodio intercambiable se reconoce como el factor químico más contribuyente al comportamiento dispersivo de las arcillas<sup>9</sup>. El parámetro básico para cuantificar este efecto es ESP, donde:

---

<sup>9</sup> Ingles, O. G. and Wood, C.C., The Contribution of Soil and Water Cations to Deflocculation Phenomena in Earth Dams, Proceedings, 37th Congress of Australian and New Zealand Assoc. for the Advancement of Sciences, Canberra, Australia, 1964.

$$ESP = \frac{\text{sodio intercambiable}}{CEC \text{ (capacidad de intercambio iónico)}} \times 100$$

Los suelos con ESP de 10 o mayor, que están sujetos a sales libres lixiviadas por filtración o por agua relativamente pura, se clasifican como dispersivos. Los criterios que se han utilizado para clasificar las arcillas dispersivas a partir de datos por ESP son (tabla 2):

**Tabla 2.** Clasificación de dispersión ESP

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

#### 1.5.2.5 SAR (Tasa De Absorción De Sodio)

Otro de los parámetros comúnmente evaluados para cuantificar el papel del sodio en la dispersión, cuando sales libres están presentes en el agua de los poros, es el SAR:

$$SAR = \frac{Na}{0.5 (Ca + Mg)} ; \text{unidades en mEq/L}$$

Este método no es aplicable si no hay presencia de sales libres. Su uso se basa en el hecho que los suelos en la naturaleza están en equilibrio con su entorno. En particular, existe una relación entre la concentración de electrolitos del agua de los poros del suelo y los iones intercambiables que la capa de arcilla adsorbe.

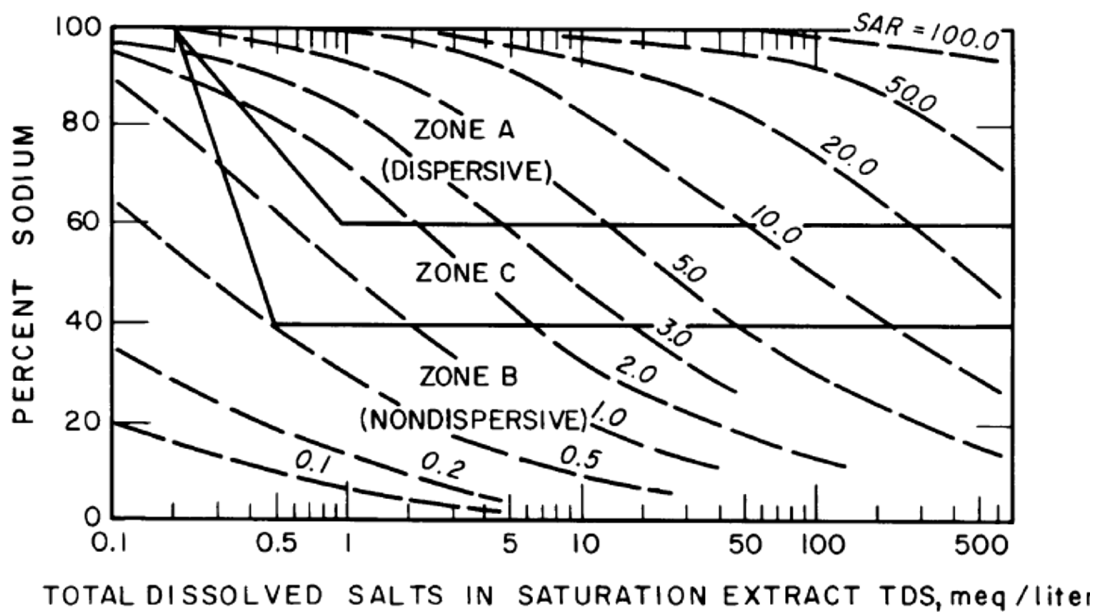
Si los suelos son dispersivos superan SAR igual a 2%. Esto muestra una concordancia razonable para los suelos con TDS (total de sales disueltas) entre 0,5 y 3 mEq/L, pero no para los suelos fuera de este rango, como se muestra en la Figura 11. El método actualmente aceptado para evaluar la influencia química en el comportamiento de dispersión se muestra en la figura 12, donde:

$$\text{Porcentaje de sodio} = \frac{Na (100)}{TDS}$$

$$TDS = Na + Ca + Mg + K ; \text{ unidades en mEq/L}$$

El uso de la figura 12 ha sido acertado en los datos preliminares que muestran suelos de un área determinada, demostrando una buena correlación entre el gráfico de la figura y el uso del ensayo de Pinhole. Se ha recomendado que las variables discriminantes de los poros de agua se evalúen para cada sitio que utilice un procedimiento de análisis discriminante<sup>10</sup>. Esto permitirá la selección de las combinaciones más exitosas de las variables para el trabajo en particular.

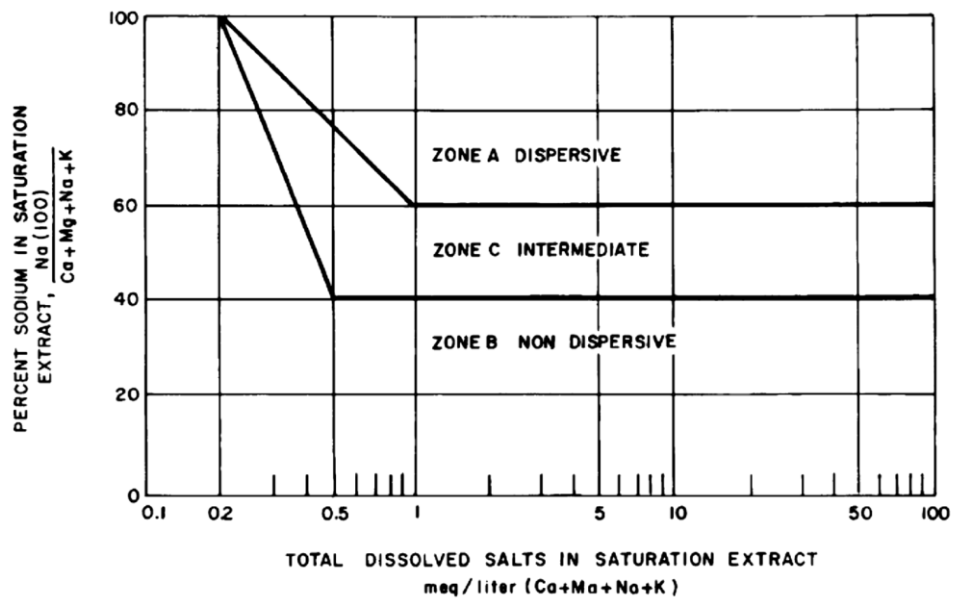
**Figura 11.** Porcentaje de sodio sobre total de sales de disueltas



Fuente: Paige-Green, P. *Dispersive and erodible soils: Fundamental differences.*

<sup>10</sup> Craft, D. and Acciardi, R.G., Failure of Pore-Water Analyses for Dispersion, Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 110, No.4, 1984.

Figura 12. *Potencial dispersividad vs TDS*



Fuente: Paige-Green, P. *Dispersive and erodible soils: Fundamental differences.*

## 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS SOBRE ARCILLAS DISPERSIVAS

Durante la realización del proceso de búsqueda encaminado a encontrar la literatura correspondiente a este tipo de suelos, específicamente arcillas de características especiales de dispersión, se destaca el hecho de que el tema y su profundización se remonta hace ya más de 40 años, culminando en una serie de experiencias y conclusiones.

Aunque la literatura citada es suficientemente extensa, se quiere resaltar que quizá no esté completa y que ciertos temas o experiencias no se hayan abordado. Esto, a causa de que muchos documentos no son asequibles, bien sea porque ya no están disponibles o porque las bases de datos en las cuáles figuran restringen de manera severa su contenido.

La mayoría de la literatura hace referencia particularmente a los problemas generados en las estructuras de tierra (diques, terraplenes, taludes, presas de tierra, etc.).

Los primeros fenómenos dispersivos de las arcillas fueron observados hace ya más de 100 años por agricultores, pero su naturaleza básica se entiende bastante bien gracias a los científicos geotécnicos y a los ingenieros agrónomos de hace un poco más de 50 años (Richards, 1954; Yema, 1937). No obstante, la importancia del tema en la práctica de la ingeniería civil no fue reconocida sino hasta inicios de los años 60's, por la investigación llevada a cabo en Australia, a causa de muchos fracasos en las presas construidas con arcilla (Aitchison y Wood, 1965).

Inicialmente, los estudios hechos indicaban que las arcillas dispersivas se asociaban únicamente con suelos formados en climas áridos y/o semiáridos y en áreas de suelos alcalinos. Pero, los mismos suelos y los mismos problemas de erosión se encontraron en climas húmedos en diferentes ubicaciones del mundo. Australia, Tasmania, México, Trinidad, Vietnam, Sudáfrica, Tailandia, Israel, Ghana, Brasil, Venezuela y muchas partes del sur de Estados Unidos experimentaron problemas con las arcillas dispersivas en proyectos de hidráulicos (Clark, 1986).

La mayoría de los estudios registrados en la literatura, han demostrado que las fallas de las estructuras construidas con suelos de arcilla dispersiva, están asociadas con la presencia de agua, grietas, asentamientos diferenciales y/o la construcción. Estos fracasos enfatizan la importancia del reconocimiento temprano y la identificación de los suelos arcillosos de dispersión, de lo contrario, los problemas que causen pueden resultar en fallas repentinas, irreversibles y hasta catastróficas.

La experiencia con miles de presas construidas de acuerdo con la práctica común aceptada, mostraba muy pocos fallos o problemas referentes con la tubificación, y la mayoría de estos fallos/problemas eran atribuibles a alguna condición no prevista por el diseñador, como el inadecuado control de calidad de construcción o alguna condición geológica no descubierta en las exploraciones. Las excepciones a comportamientos satisfactorios de las presas de tierra homogénea, donde las

fugas surgieron aguas abajo, sin haber pasado por los filtros, se dieron en diques relativamente pequeños y contruidos económicamente con una atención mínima de ingeniería (Sherard y Decker, 1977).

La mayoría de los problemas reportados con arcillas dispersivas, se produjeron en presas de tierra ya existentes contruidas antes que los métodos de identificación y las prácticas de diseño aceptadas para tratar con este tipo de suelos. Las fallas más comunes registradas para estas estructuras, son la erosión interna, la tubificación o *piping*, la erosión de la superficie y *jugging* (la formación de la parte vertical de un túnel subterráneo, donde la erosión de la base es mayor que la parte superior, semejante a una jarra).

## **2.1 Antecedentes mundiales**

### **Australia - 1964**

En una zona de suelos salinos, donde el embalse se llenó inicialmente con agua del pozo, con una concentración de sales relativamente alta; la presa se mantuvo estable durante algunos años, aunque se presentaron pequeñas pérdidas continuamente por filtraciones menores. Tras la finalización de una tubería de 32 kilómetros para traer agua de un río con menor concentración iónica de sodio, la presa falló por tubificación 3 días después debido a la reducción de la concentración de sales.

### **Estados Unidos - 1972**

En los estados de Oklahoma, Mississippi y Arizona, entre los años 1970 y 1972, se presentaron fenómenos de tubificación y fallas sobre las estructuras de cientos de presas, debido a las intensas lluvias y a las características dispersivas de la arcilla.

Muchas de las presas fueron tratadas para protegerse de las fallas por tubificación. En estas, se hicieron estudios de dispersión, físicos y químicos, donde la identificación en campo no tuvo una buena correlación con las

circunstancias del sitio o las pruebas de laboratorio hechas. El primer tratamiento que se usó, fue aplicar una capa de cal hidratada, para reducir la dispersividad y mejorar la resistencia del suelo; seguido por el relleno con capas de arena y grava para la eliminación de los túneles.

La estabilización del suelo con cal, es lograda a través del intercambio de cationes, la floculación, la aglomeración, la carbonatación de la cal y la reacción puzolánica<sup>11</sup>.

Las 3 primeras reacciones toman lugar rápidamente, cambiando las propiedades del suelo, como la resistencia y la plasticidad, mientras que la reacción puzolánica sucede en un momento diferente.

Específicamente, los cambios producidos por la estabilización son:

- El índice de plasticidad de los suelos decrece de forma rápida, debido a la disminución del límite líquido.
- El suelo se aglomera, disminuyendo el contenido de arcilla sustancialmente.
- Se acelera la ruptura de fragmentos de arcilla durante la mezcla, y como resultado de la aglomeración y la desintegración, el suelo se vuelve más friable y se puede trabajar fácilmente.
- Ayuda en el secado de los suelos húmedos con rapidez, acelerando así la compactación.
- Las características de contracción y expansión del suelo se reducen notablemente.
- Después del curado, la resistencia a la compresión no confinada aumenta considerablemente.
- Los valores de carga, medidos por varias pruebas como el CBR o el ensayo triaxial, aumentan sustancialmente.

---

<sup>11</sup> Una puzolana es un material, natural o artificial, que contiene fundamentalmente silicio y/o aluminio, lo que le da un carácter ácido y por tanto, una gran afinidad por la cal. La puzolana molida y en presencia de humedad reacciona con el hidróxido cálcico (activador) a temperatura ambiente, dando lugar a una nueva formación de compuestos estables, poco solubles en agua y de características cementantes.

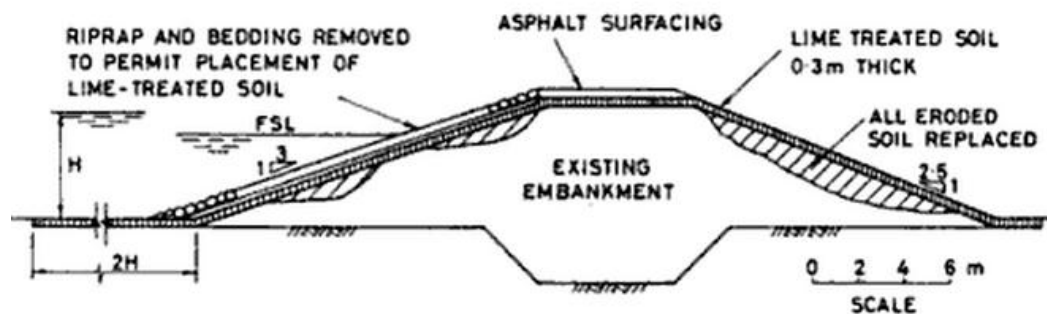
- La capa estabilizada con cal, forma una barrera resistente al agua, impidiendo la penetración de agua por gravedad y por capilaridad.

### Tailandia – 1977

Entre los años de 1970 a 1977, un alto número de presas de tierra sufrieron seria tubificación y erosión por lluvia, y otras tantas más fallaron durante el primer llenado del embalse. Un comportamiento típico para las presas construidas con material arcilloso de características dispersivas.

Algunas medidas que se optaron para reparar las presas dañadas por este fenómeno de dispersión del suelo, envolvían el remplazo del material erodable y la prevención de futuras fallas para el existente y nuevo material por tratamientos físicos y químicos. Se instalaron nuevas zona de impermeabilización conectadas a un lecho rocoso. Para proveer protección contra la tubificación, fue ubicado un suelo tratado con yeso en la zona impermeable. La cresta de las presas fue sellada con una superficie de asfalto sobre una capa de laterita<sup>12</sup>. Aguas abajo, el material dañado fue removido y remplazado. El tratamiento con cal también fue usado en la cresta para prevenir la erosión que pudiera existir por la filtración de agua a través del asfalto.

**Figura 13.** *Detalles de reparación en las presas*



Fuente: ASTM STP 623, *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*

<sup>12</sup> La laterita es el suelo propio de las regiones cálidas, caracterizado por la pobreza en sílice y su elevado contenido en hierro y alúmina.

### **Grecia – 1977**

Se estudió la relación de las propiedades dispersivas de las arcillas con el rendimiento de las capas superiores de una presa de tierra antes del llenado, y la selección de materiales arcillosos para ser usados en la construcción de la estructura. Suelos con alto contenido de sodio se encontraron, principalmente en las zonas donde la capa freática estaba cerca o variaba por encima de la superficie del suelo.

No se reportó ningún daño debido a la erosión por tubificación en las presas, pese a las características dispersivas de la arcilla con que fue construida la estructura. Una posible explicación es que las aguas del río tienen un alto contenido de calcio que pudo contribuir a minimizar los efectos de los fenómenos de erosión del agua que se filtra a través de las grietas en la presa.

### **Brasil - 1977**

En la represa de Sobradinho, en el estado de Bahía, existe una predominante cantidad de arcillas dispersivas, teniendo en cuenta el criterio de la "concentración de sodio en el agua intersticial de los suelos".

Se llevaron a cabo pruebas de filtros de arena utilizando probetas cilíndricas con un agujero circular céntrico y de grandes probetas prismáticas con una ranura vertical en el centro. Los resultados revelaron que los filtros de arena compactada, actuaron de manera segura para el control y sellado de las fugas a través de las grietas en la estructura.

Los ensayos de los filtros de arena fueron llevados sobre 3 especímenes: uno altamente dispersivo, con baja dispersividad y uno no dispersivo, variando la gradación de la arena, el tamaño del agujero, el gradiente hidráulico y la calidad del agua, muy similar a las condiciones del ensayo Pinhole.

Se observó que la variación de los diámetros, de agua destilada por agua del río Sao Francisco y de los gradientes hidráulicos, solo tuvo un poco de influencia en la velocidad de sellado, sin mayor representación.

La variación de la gradación de la arena fue estudiada un poco más extensivamente, obteniendo las siguientes observaciones:

*Filtros de arena con gradación específica:* Para las arcillas con baja dispersividad, el flujo se presentaba claro y algunas veces ligeramente teñido. Por otro lado, para las altamente dispersivas el flujo siempre fue turbio y sucio con suspensión de partículas, independiente de la gradación de la arena.

Las partículas de arcilla atraviesan el filtro de arena, mientras que las de limo son contenidas, formando una ligera capa que gradualmente va cerrando el agujero.

*Filtros de arena gruesa:* Todas las muestras de arcilla fueron severamente erosionadas, mostrando altas velocidades de flujo.

Las pruebas de laboratorio demuestran que los filtros detienen algunos tamaños de partículas muy finas, que generalmente en el control de la tubificación y del sellado de las fugas se van a través de la arcilla dispersiva.

Los autores creen que los filtros son una práctica razonable para construir grandes presas de tierra con núcleos de arcilla dispersiva, siempre y cuando los detalles de diseño sean adecuados.

Ensayos similares en arcillas altamente dispersivas se realizaron en otras represas de Brasil, usando especímenes más largos y arrojando los mismos resultados. La acción de sellado es diferente de la de los filtros normales, pues no puede prevenir el paso de las fracciones coloidales de la arcilla, en cambio, cuando entran en el filtro de arena estas son retenidas sellando gradualmente la fuga aguas arriba del canal.

### **Sur África - 1980**

En Zimbabue, una presa sufrió daños debido a la erosión del suelo, el cual no registraba una cantidad de sodio significativa en los ensayos que se llevaron a cabo. Durante una visita a la presa, notaron que el área era rica en depósitos de litio, particularmente mica de litio (lepidolita), y teniendo en cuenta que el orden de reactividad de los metales alcalinos es  $Li > Na > K$ , etc., inmediatamente concluyeron la causa de la alta dispersividad presentada. Para corregir, se inyectó cal hidratada sobre el suelo de la presa, para mitigar los efectos por el alto contenido de Litio.

En las áreas de KwaZulu-Natal, provincia de Sudáfrica, se hicieron numerosos ensayos físicos y químicos para identificar la dispersión, pero sin resultados satisfactorias en todas las circunstancias, por lo cual Craft y Acciardi (1984) sugirieron el uso del análisis discriminante, el cual permite la influencia de una serie de variables que se evalúan colectivamente para determinar la dispersividad del suelo.

El Análisis discriminante requiere un conocimiento previo de las relaciones entre las muestras, y determina qué parámetros son los mejores en la separación de las muestras en grupos conocidos. Los suelos podrían ser fácilmente agrupados según su dispersividad según lo determinado por el ensayo Pinhole.

Las combinaciones utilizadas incluyeron las pruebas que en general mostraron una buena concordancia entre sí: Pinhole, Crumb, CEC vs ESP, TDS vs NA% y el SAR. Los ensayos de conductividad eléctrica, pH, así como el SCS no fueron buenos indicadores en la zona.

La ventaja del análisis discriminante, es que la información puede ser graficada permitiendo una clasificación fácil de observar.

Puesto que ninguna prueba se ha desarrollado para que pueda identificar todos los suelos dispersivos, es ampliamente aceptado que una serie de pruebas sean realizadas y que sus resultados combinados evalúen la dispersividad.

Los valores asignados para cada prueba, corresponden a la confiabilidad de estos. Para el ensayo de Pinhole, el cuál tiene la mejor indicación en el grado de dispersión, se fijó un valor de 5 para alta dispersividad (D1). Para los demás ensayos se determinaron valores de igual manera, como se muestra en la tabla 3.

Si el total valor en la clasificación es igual 16, el suelo se clasificará como extremadamente dispersivo; si suma igual o mayor que 12, el suelo se clasifica como altamente dispersivo; si varía entre 8 y 11 será moderadamente dispersivo; si el rango está entre 5 y 7 su clasificación será ligeramente dispersivo. Si es menor o igual a 4 se indica que no hay dispersividad.

### **Pakistán – 1985**

En la presa de Surla, también se trataron mecanismos de falla similares a las de las demás presas de tierra anteriormente descritas. Para está presa se concluyó lo siguiente:

**Tabla 3.** Sistema de clasificación para suelos dispersivos

	Altamente dispersivo	Moderado	Ligeramente dispersivo	No-dispersivo
Pinhole	5	3	1	0
CEC vs ESP	4	3	1	0
Crumb	3	2	1	0
SAR	> 2	1,5 a 2		< 1,5
TDS vs %Na	2	1		0

Que el Incremento de la humedad del suelo de cimentación en el llenado del depósito de agua, se produjo porque no se adoptaron medidas para comprobar filtraciones hacia el material expansivo de la base.

La erosión del material arcilloso en la base de la presa Surla, presentaba una naturaleza muy dispersiva. El agrietamiento de la estructura inicialmente se produjo debido a la presión por la expansión de las arcillas. Así, cuando el agua pasó por las losas y entró por debajo de ellas través de las grietas, comenzó la erosión de las arcillas en la fundación. Grandes cavernas se formaron bajo la estructura de hormigón y Las losas posteriormente se hundieron en su propio peso, deslizándose dentro del río.

Otro factor importante y del cuál se hace mucho énfasis por los autores, son las insuficientes investigaciones geotécnicas que se llevan a cabo antes de la iniciación de los proyectos. Al Parecer, los geólogos sólo involucraron la investigación geotécnica y las pruebas pertinentes del suelo, pero sin la debida consideración.

La mala práctica ingenieril, como la mala construcción de los componentes de la presa o en este caso específico, y la equivocada utilización de las camas de piedra arenisca, no garantizaron la seguridad de la estructura. Alternativamente, la estabilización química con cal también pudo haber sido considerada como una medida para reducir la dispersión de las arcillas o pudo usarse algún tipo especial de forjados reticulares.

#### **Argentina - 2004**

En los alrededores de ciertos embalses (Cuesta del Viento y de Ullum, en la provincia de San Juan) se observaron procesos de tubificación que no han sido suficientemente estudiados ni considerados. En el sector de entre La Laja y El Salado, se buscaba reconocer la existencia de los procesos de tubificación y analizar los distintos factores ambientales tales como litología, clima y rasgos en la estructura del suelo que han participado en el desarrollo del proceso. Previamente,

se elaboró un análisis geomorfológico del área, mediante el examen e interpretación de fotogramas a escala aproximada 1:50.000 y de imágenes satelitales Landsat 1:250.000.

En el control de campo se seleccionó una quebrada muy afectada por tubificación para el muestreo y para el estudio morfométrico (tamaño, profundidad y disposición vertical, horizontal o sub-horizontal) de los canales de erosión. Las tareas de campo se realizaron en dos estaciones contrastadas, una en invierno de 1996 (seco) y la otra en verano del 2002 (húmeda), con el objeto de precisar la evolución de los canales y del relieve en un lapso de seis años.

De la quebrada seleccionada se extrajeron dos muestras, una en la porción superior de una ladera y la otra en la base de la misma, para determinar valores de conductividad eléctrica, pH, y cationes en el extracto de saturación (calcio, magnesio, sodio y potasio); aniones en el extracto de saturación (cloruros, sulfatos y bicarbonatos) y el contenido calcáreo. Con los valores de calcio, magnesio y sodio expresados en mEq/l del extracto de saturación se calculó la relación de adsorción de sodio (RAS). Los resultados arrojaron concentraciones elevadas de sodio, considerando esto como la indicación de arcillas dispersivas y la generación de un sistema superficial de grietas ya observado.

El corto período de control efectuado (6 años) no permitió cuantificar la velocidad del proceso de tubificación; no obstante este tipo de relieve de erosión retrocedente<sup>13</sup> señala la tubificación como un proceso sub-superficial muy activo en la formación de las características geomorfológicas de esta región.

En aspectos generales, los mecanismos de falla, la identificación, las medidas correctivas y preventivas por las que se optaron y las conclusiones a las que se llegaron, podrían convertirse en un recorrido iterativo de información, pues toda esta experiencia acumulada hasta hoy sobre los fenómenos ocurridos en las presas de tierra es muy similar. En cambio, es muy poca la información relevante

---

<sup>13</sup> Proceso de destrucción fluvial en el sentido contrario a la corriente y hacia las cabeceras de éste.

sobre otros aspectos semejantes para los cimientos u otras estructuras de fundación.

En 1977, Ziegenbalg y Crosby demostraron que para sellar la dispersión de los suelos en los cimientos, era posible usarse grandes volúmenes de un *grout*<sup>14</sup> de sulfato de calcio sobresaturado bajo condiciones y preparación en campo. Dependiendo del grado de súper-saturación, las soluciones conducen a la precipitación artificial de yeso, dentro de 2 a 8 horas. En este tiempo, las micro fisuras pueden ser selladas (proceso de cristalización).

El material para el *grout* debe ser una solución capaz de penetrar las minúsculas fisuras para favorecer y prevenir que el material entre en dispersión. Todas las actividades que introduzcan agua en los cimientos, tales como la perforación o el *grouting*, deben ser limitados al mínimo.

En la perforación (rotativa y de golpe) para minimizar el efecto sobre los potenciales suelos dispersivos, debe hacerse con agua de contenido balanceado de salinidad. La inclusión de sulfato de calcio debe ser usada en todas las actividades de perforación. Similarmente, el *grouting* deberá ser diseñado para los efectos de dispersividad, usando materiales de bajo contenido de agua.

En la provincia de Entre Ríos, algunos suelos son denominados “barreros”, los cuales presentan características especiales en su comportamiento; a un alto contenido de agua durante el periodo de inundación, lo sigue una alta tasa de evaporación y secado.

Se hallaron características similares con las arcillas dispersivas, y se plantearon la evaluación del efecto que produciría adherir yeso y su interacción con la materia orgánica y un fertilizante químico, y la producción de biomasa forrajera en el suelo “barrero”.

---

<sup>14</sup> También llamada lechada de relleno, se define como una mezcla de material cementante y agua, con o sin agregados dosificada para obtener una consistencia que permita su colocación sin que se produzca la segregación de los constituyentes. Se utiliza para rellenar espacios o cavidades, para garantizar la continuidad entre los elementos de la edificación

De 1997 a 1999, se hicieron ensayos sobre un suelo disperso, afectado por sodio, de pH neutro y de muy baja productividad. Se ensayó con 4 diferentes dosis de yeso (de 0, 3, 6 y 9 Ton/Ha) combinadas con 6 Ton/Ha de enmienda orgánica (cama de pollo parrillero o guano, que cae sobre una cama de cáscara de arroz, girasol o aserrín) y con 150 Kg/Ha de fertilizantes químicos, llevando 10 tratamientos diferentes (tabla 4).

El primer cultivo forrajero (comprende el alimento vegetal para animales domésticos, como el heno, la alfalfa, girasol, algodón, etc.) que se usó fue avena amarilla, luego sorgo y posteriormente avena con trébol rojo. Se evaluó la biomasa producida y el contenido de pH y sodio intercambiable.

**Tabla 4.** *Tratamientos y dosis utilizadas*

<b>Tratamiento Nº</b>	<b>Yeso [Kg/Ha]</b>	<b>Enmienda orgánica [Kg/Ha]</b>	<b>Fertilizante [Kg/Ha]</b>
<b>1</b>	0	0	0
<b>2</b>	3000	0	0
<b>3</b>	6000	0	0
<b>4</b>	9000	0	0
<b>5</b>	0	6000	0
<b>6</b>	3000	6000	0
<b>7</b>	6000	6000	0
<b>8</b>	0	0	300
<b>9</b>	3000	0	300
<b>10</b>	6000	0	300

Los resultados indicaron que gracias a la aplicación de yeso en el suelo, el ESP disminuyó de un 12% a un 4% con la dosis más alta. El decrecimiento se atribuye al intercambio de los iones de sodio por iones de calcio y su posterior lixiviación<sup>15</sup>. El nivel de percolación aumentó marcadamente, mejorando la entrada y el movimiento del agua en el suelo, favoreciendo la disponibilidad de esta para el desarrollo vegetal.

<sup>15</sup> Proceso mediante el cual se lava una sustancia pulverizada con el objetivo de extraer de ella, las partes que resulten solubles.

La dosis de yeso de 3 Ton/Ha, fue suficiente para lograr altos valores de estabilidad de agregados y buena conductividad hidráulica, sin diferencias significativas con las dosis más altas. Tanto la enmienda orgánica como el fertilizante no tuvieron efectos positivos sobre la condición física del suelo. Esto contribuyó a la emergencia de los cultivos y al desarrollo radicular, aumentando la producción de materia seca.

Estos resultados coincidieron con los encontrados en otras investigaciones, donde se han registrado aumentos en la producción de materia seca, tanto de cereales como de especies forrajeras, producto de la mejora en las condiciones físicas y químicas del suelo producidas por la enmienda con yeso (Mendoza, 1980).

Las observaciones del impacto del fertilizante y la enmienda orgánica aplicados sin combinación con yeso, dieron a conocer la necesidad primaria de lograr una mejora física del suelo para que las prácticas ensayadas tengan un efecto positivo, puesto que no presentaron ningún tipo de mejorías del terreno. Es decir que las limitantes físicas son el principal problema a resolver en un suelo con problemas de dispersión por el sodio, por lo cual no se observaron respuestas a la fertilización ni a la enmienda orgánica individualmente.

### **Turquía - 2011**

Recientemente, se investigó el efecto de la solución de cloruro de magnesio, como medida contra la dispersión y el potencial de expansión de los suelos arcillosos. Para ello, se llevaron a cabo ensayos de identificación de dispersividad sobre 3 muestras de suelo de diferentes áreas en la provincia de Afyon. Los resultados arrojaron un efecto significativo de la solución de cloruro de magnesio como aditivo de mitigación de la dispersión, recomendando un 7% de adición.

## **2.2 Antecedentes nacionales**

### **Bogotá - 2005**

En el barrio Usme, al sur de Bogotá, estudiantes de la Universidad de la Salle se interesaron en el tema y advirtieron sobre la posible existencia de suelos dispersivos en la zona, debido a que algunas edificaciones han sufrido deterioros estructurales que indicaban este fenómeno.

Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio sobre muestras representativas de suelos los de la zona para determinar su potencial de dispersividad. Para la caracterización, se hicieron 5 sondeos (Una muestra de suelo por cada sondeo) que incluían ensayos de clasificación de suelos (límite de Atterberg, granulometría, límite plástico, etc) y el ensayo de Pinhole.

Con los resultados obtenidos en los ensayos de clasificación, determinaron que estos suelos corresponden a arcillas de baja plasticidad, que presentan dispersividad aunque las pruebas químicas hayan dado un resultado negativo en la salinidad de este. Sin embargo, el ensayo de Pinhole indicaba dispersión, lo que muestra que la erosionabilidad para esta zona, deberá ser causada por efectos físicos.

### **Girón - 2005**

Una catástrofe se presentó cuando el Río de Oro se desbordó a causa de las fuertes y constantes lluvias que activaron una serie de deslizamientos de tierra, que terminaron con la destrucción de cerca de 1000 viviendas y la muerte de más de 20 personas.

Aparentemente la quebrada Angulito tuvo un cauce profundo y ancho hasta desembocar al Río de Oro, que posteriormente fue obstaculizado por rellenos implementados con el fin de construir urbanizaciones. Estos depósitos contenían materiales arenosos característicos del río de Oro y de limos provenientes del sector de la quebrada Angulito. La quebrada pertenece a la formación

Bucaramanga, que corresponde a un depósito sedimentario aluvial caracterizado por erosionarse fácilmente, formando surcos y cárcavas que dan forma a los estoraques.

En la investigación se realizaron diferentes tipos de ensayos físicos (Crumb, Pinhole y doble hidrómetro) y químicos (pH y ESP). Como resultado de estos ensayos, se pudo establecer que los suelos de la zona presentan hasta un 90% de dispersividad, una cifra alarmante y que permite esclarecer una parte del porqué, de los deslizamientos que reportaron la tragedia.

En la literatura, los autores sugirieron como medida de prevención la adición de yeso agrícola como una posible solución a los problemas de dispersión. De igual manera, consideran que un plan de revegetalización de la cuenca, utilizando especies nativas como el fique, de raíz profunda, puede brindar al suelo una resistencia adicional que reduzca su susceptibilidad a deslizamientos.

### **3. ENSAYO PINHOLE**

En la caracterización de los suelos dispersivos y bajo la norma ASTM D4647 hay tres maneras de desarrollar el laboratorio. En las pruebas realizadas se deciden caracterizar las muestras de suelo con el método A, pues es la que posee la más variada de clasificación.

#### **3.1 Clasificación Método A.**

D1 – D2 Arcillas dispersivas que fallan rápidamente bajo una cabeza hidráulica de 50mm.

ND4 – ND3 arcilla con características bajas o moderadas de dispersión, con cabezas hidráulicas ente 50 mm 180 mm

ND1 – ND2 Arcilla no dispersiva con baja erosión, cabezas hidráulicas entre 180mm y 1020 mm de presión.

#### **3.2 Materiales.**

Cilindro en acrílico con dimensiones de 100 mm de largo y 38 mm de diámetro interno provista de dos cabezas con juntas y dos tornillos para el cierre.

Cono truncado metálico de 10 mm de base inferior y de 3.8 mm de diámetro superior, y una altura de 12.7 mm, perforado por su eje longitudinal con un orificio de 1.58 mm de diámetro.

Seis malla metálicas en forma de disco No 14 que ajustan en el interior del cilindro.

Soporte calibrado para medir niveles piezométricos.

Agujas y/o brocas de 1.00mm para perforar el orificio en muestra.

Tuberías flexibles para conexiones.

Compactador tipo Army, con una masa de 0.5 Kg y una altura de caída de 350mm.

Probetas graduadas de 250 ml y 100 ml

Cronometro

Tamiz No 10

Agua destilada

Espátula

Gravilla de granulometría comprendida entre los tamices No10 y No 14.

### 3.3 Método y Procedimiento.

Compactar la probeta de 40 mm de largo dentro del cilindro de la prueba, con la muestra restante hallar el contenido de humedad. La compactación se realiza con el dispositivo tipo Army, con el cual se deben hacer 12 ascensos con una masa de 0.5 kg. Figura 15.

Insertar el cono guía en la parte superior, ejerciendo presión. Luego insertar la aguja por el cono y se presiona hasta atravesar la probeta. Realice unos giros antes de retirar la aguja esto para tener un buen orificio. Figura 16.

**Figura 14. Elementos del laboratorio.**



*Fuente. Archivo fotográfico investigación.*

Ubique dos mallas en la parte de enfrente y posterior y agregue las gravillas previamente lavadas. Y ubicar las dos mallas restantes sobre los extremos del cilindro. Ajustar las dos placas mediante los tornillos y garantizar un cierre hermético del dispositivo. Figura 17.

Ubicar el dispositivo en forma horizontal y acoplarlo al manómetro. Figura 18

### **Figura 15. Compactación del Espécimen.**



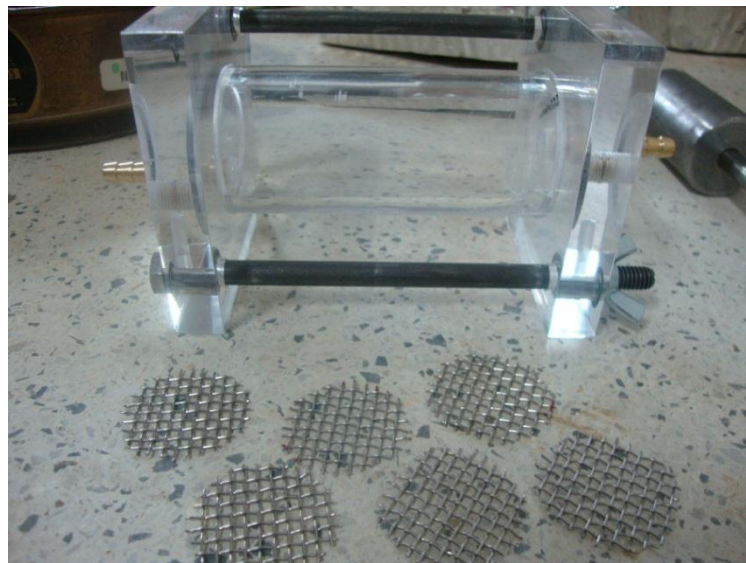
*Fuente. Archivo fotográfico investigación.*

**Figura 16. Perforación del espécimen**



*Fuente. Archivo fotográfico investigación.*

**Figura 17. Mallas y elementos de ajuste.**



*Fuente. Archivo fotográfico investigación.*

**Figura 18. Dispositivo Pinhole.**



*Fuente. Archivo fotográfico investigación*

Se comienza con una cabeza hidráulica de 50mm de presión, y se registra el tiempo de inicio. Registrar los volúmenes de agua recogidos al cabo de dos, cuatro, cinco, seis, ocho y diez minutos así como el estado de turbidez del agua. Si al momento de iniciar la prueba no hay indicios de la salida del fluido detener la prueba y revisar la muestra.

Empezamos con una cabeza hidráulica de 50mm de presión durante 5 min, si el efluente que ha salido es oscuro y el caudal a estado entre los valores de 1.0 a 1.4 ml/s la prueba esta completa. Desmonte el aparato y corte transversalmente la muestra, compare el diámetro de orificio, si este es mayor dos veces mas que el de la aguja utilizada para abrirlo se clasifica este suelo como altamente dispersivo - D1-.

Si el efluente que sale de la cabeza hidráulica de 50 mm de presión es claramente oscuro y su caudal de salida no varia entre 1.0 ml/s durante los primeros 5 min, adiciones 5 más, si al final el efluente sigue saliendo oscuro deténgase y determine el tamaño del agujero, si este supera en 1.5 veces mas el diámetro de la aguja se clasifica como arcilla dispersiva -D2-.

Si al terminar los 10 min y el efluente ligeramente oscuro y su caudal es de 0.4 a 0.8 ml/s aumente la cabeza hidráulica a 180 mm pre presión, si el efluente es claramente oscuro y el caudal aumentado de 1.4 a 2.7 ml/s, deténgase y examine el tamaño del agujero, si este se encuentra entre 1.5 y 2 veces el diámetro de la aguja clasifique el suelo como arcilla moderadamente dispersiva -ND4-

Si con la presión hidráulica en 180 mm el efluente sale claro o con algunas partículas y después de 5 min continua con un caudal de 0.4 a 0.8 ml/s eleve la presión a 380 mm, si el efluente se ha oscurecido y el caudal se ha aumentado entre 1.8 a 3.2 ml/l deténgase y clasifique el suelo como ligeramente dispersivo – ND3-.

Si después de 5 min y una presión hidráulica de 380 mm el efluente es completamente claro y el caudal es de 1.0 a 1.80 ml/s eleve la presión hidráulica a 1020, si después de los 5 min el efluente es ligeramente oscuro y el caudal es mayor 3.0 ml/s clasifique el suelo como no dispersivo -ND2-. Puede considerarse suelo no dispersivo ND1. Los suelos ND1 bajo presiones de 1020 mm generalmente tienen un caudal menor que 3.0 ml/s y al examinar el agujero este no se ha alargado.

Durante el desarrollo del ensayo se deben tomar los datos de caudales y tiempos en los cuales los flujos salen o han salido turbios y mediante especulación visual clasificar el suelo entre los parámetros que encajan en el método A.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los problemas que se presentan en estructuras de tierra en el mundo debido a la erosión de las arcillas dispersivas, datan de alrededor de 50 años; desde entonces los estudios se han enfocado en la estabilización de este fenómeno, por medio de la inyección de tratamientos químicos con magnesio, sulfato de aluminio o cal hidratada, siendo este último el procedimiento con mejores resultados y por consiguiente el más usado y aceptado.
- Se destaca la importancia de realizar estudios geotécnicos que incluyan los métodos para la identificación de suelos dispersivos, pues no se observó un caso concreto donde se haya referenciado de alguna forma este fenómeno.
- Aunque el método Pinhole resulta ser el más aceptado para la identificación y clasificación de arcillas dispersivas, la literatura recomienda que se debe complementar con los demás ensayos de caracterización (crumb, doble hidrómetro, SAR y ESP) para obtener resultados más acertados y confiables.
- Consideramos que el ensayo Pinhole, debería ser incluido como una práctica más en las asignaturas de laboratorio de caracterización de suelos, con el fin de ampliar el conocimiento sobre el fenómeno de dispersión en los estudiantes de ingeniería civil.
- Sugerimos, además, que dentro de la temática de las materias que tratan sobre los suelos, sean abarcados los fenómenos de erosión, y así, ampliar el perfil profesional de los próximos ingenieros civiles.

## 5. REFERENCIAS

- Bermeo Tierradentro, D.A.; Gaitán Jiménez, D.A. y Cantor Velasco, J.A. Evaluación de los suelos dispersivos encontrados en un sector de Usme. Bogotá 2005. Tesis (Ingeniero Civil). Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Civil.
- Bourdeaux, Guy and Imaizumi, Hideo. Dispersive clay at Sobradinho Dam. En : Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. ASTM STP 623, 1977; p. 13 - 24.
- Cole, B.A., et al. Dispersive clay in irrigation Dams in Thailand. En : Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. ASTM STP 623, 1977; p. 25 - 41.
- Coumoulos, D.G. Experience with studies of clay erodibility in Greece, En : Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. ASTM STP 623, 1977; p. 42 - 57.
- Decker, R.S. and Dunnigan, L.P. Development and use of the soil conservation service dispersion test. En : Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. ASTM STP 623, 1977; p. 94 - 109.
- Forsythe, Peter. Experiences in identification and treatment of dispersive clays in Mississippi Dams. En : Dispersive clays, related piping, and erosión in geotechnical projects. ASTM STP 623, 1977; p. 135 - 155.

- Ghuman, O.S.; Allen, R.L. and McNeill, R.L. Erosion, corrective maintenance and dispersive clays. En : Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. ASTM STP 623, 1977; p. 172 - 190.
- Heinz, W.F. and Segatto, P.I. Grouting of dispersive dam foundation. Geotechnics for developing Africa. 1999; p. 539 - 548.
- Javed, F. and Nasim, A. Geotechnical evaluation of a morning glory spillway failure founded on expansive and dispersive clay. Pakistan: Engineering congress, 70th annual session proceedings, paper no 663, 2006.
- Mendoza, R. Efecto del agregado de yeso a un suelo sódico de la depresión del río salado y su repercusión sobre algunas características fisico-químicas, microbiológicas y de producción de forraje. Revista de investigaciones agropecuarias. INTA. Buenos Aires, Argentina. Volumen xv, n° 4.
- Quintero, C.; Boschetti, N.; Durand Morat, A. y Fettolini, S. Recuperación de suelos dispersivos por medio de enmiendas. Universidad Nacional de Entre Ríos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Argentina, 2004.
- Sherard, J.L.; Dunnigan, L.P. and Decker, R.S. Some engineering problems with dispersive clays. En : Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects. ASTM STP 623, 1977; p. 3 - 12.
- Sotelo, R.R. Identificación de arcillas erodibles dispersivas utilizando ensayos agronómicos de suelos. Centro de Geo-Ciencias aplicadas. Facultad de Ingeniería. UNNE. Argentina, 1999.
- Suarez Zambrano, N.R. y Suarez Sanchez, J.A. Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos en la cuenca de la quebrada

angulito en girón. Santander, 2006. Tesis (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

- Suvires, G.M. Procesos de piping en el piedemonte distal de la precordillera oriental, provincia de san juan: factores y relieve. Revista de la Asociación Geológica Argentina. Argentina, 2004.
- Türköz, M.; Savaş, H. and Tosun, H. Stabilization of problematic clay soils with magnesium chloride solution. Eskisehir Osmangazi University. Civil Engineering department. 2011.
- Umesha, T.S.; Dinesh, S.V. and Sivapullaiah, P.V. Control of dispersivity of soil using lime and cement. En : International journal of geology. Issue 1, volume 3, 2009.
- Walker, D.J.H. and Jermy, C.A. Assessing the dispersivity of soils, geotechnics for developing Africa. 1999, p. 341 - 345.

## 6. ANEXOS

### ANEXO A

#### Guía de laboratorio Ensayo Pinhole

##### Resumen

Esta es una práctica de laboratorio que mide de forma cualitativa la dispersividad en suelos arcillosos compactados o también puede utilizarse con muestras inalteradas, siguiendo las indicaciones respectivas. El procedimiento se basa en hacer fluir agua destilada a través de un orificio de 1 mm sobre el eje longitudinal de la muestra, observando la turbidez de a la salida del flujo y clasificar el suelo de acuerdo con la nube de partículas disueltas por la acción de arrastre del agua, y el aumento en el tamaño del agujero por el cual se hizo fluir.

**Palabras claves:** erosión, tubificación, arcilla dispersiva, dispersividad, Pinhole.

##### Introducción –significado y uso-

EL ensayo Pinhole proporciona un método de identificación para las características de suelos arcillosos usados en la construcción de elementos en tierra. Las fallas por tubificación que se trataran de modelar son fenómenos que ocurren usualmente en presas de tierra, terraplenes, y otros elementos. La falla se origina por la infiltración de agua en las grietas que presenta los elementos, luego por acción del flujo, algunas partículas entran en suspensión y son arrastradas generando así pérdidas en las propiedades mecánicas del elemento comprometiendo toda la estructura.

Este método modela la acción del agua fluyendo a lo largo de las grietas presentes en las obras construidos en tierra. Se encuentran otros métodos indirectos tal como la prueba de doble hidrómetro y el crum, los cuales relacionan la turbidez de una nube suspendida de arcilla como indicador de la dispersividad. La comparación de resultados entre el ensayo Pinole contra las pruebas

indirectas, presenta una mejor correlación en la clasificación de los suelos dispersivos.

### **Clasificación.**

El desarrollo de esta prueba proporciona las bases para la clasificación del suelo, dentro de la categoría de dispersivo acorde a los siguientes criterios.

#### **Método A**

D1 – D2 Arcillas dispersivas que fallan rápidamente bajo una cabeza hidráulica de 50mm.

ND4 – ND3 arcilla con características bajas o moderadas de dispersión, con cabezas hidráulicas ente 50 mm 180 mm.

ND1 – ND2 Arcilla no dispersiva con baja erosión, cabezas hidráulicas entre 180mm y 1020 mm de presión.

#### **Método B**

D – Arcilla dispersiva que se erosiona rápidamente con una cabeza hidráulica de 50 mm de presión.

SD – Arcilla ligeramente dispersiva que se erosiona con una cabeza hidráulica de 180 mm de presión.

ND – Arcilla no dispersiva bajo cabeza hidráulica de 380mm de presión.

#### **Método C**

D1 – D2 Arcilla dispersiva que se erosiona rápidamente con cabeza hidráulica de 50 mm de presión.

ND4 – ND3 Arcillas dispersivas que se erosiona ligeramente con cabezas hidráulicas entre 50 mm 180 mm y 380 mm de presión.

ND2 – ND1 Arcilla no dispersiva.

### **Limitaciones.**

Durante el desarrollo de los procedimientos para obtener resultados entre los suelos arcillosos que se erosionan y los que no, se deben tener en cuenta una serie de limitaciones en el uso de este ensayo.

Este método no aplica a los suelos con menos del 12% de partículas con un tamaño de 0.005 mm y con un índice de plasticidad inferior o igual a 4. Estos suelos generalmente tienen baja resistencia a la erosión independientemente de las prácticas de dispersión.

Los resultados más consistentes se producen cuando el contenido de humedad de la muestra no se altera.

Este método se desarrolló para poner a prueba las muestras alteradas de suelo las cuales se compactan en el cilindro de prueba, también sirve para realizar procedimientos con muestras inalteradas siempre y cuando estas estén cortadas y selladas en el cilindro del ensayo. Algunos investigadores han encontrado que esta prueba no es aplicable en la evaluación de la dispersividad de muestras inalteradas en arcillas de alta susceptibilidad. Esto se debe a que en el resultado del ensayo puede ser clasificado este suelo como dispersivo pero en su estado natural no presenta este comportamiento.

### **Aparato**

Cilindro en acrílico con dimensiones de 100 mm de largo y 38 mm de diámetro interno provista de dos cabezas con juntas y dos tornillos para el cierre.

Cono truncado metálico de 10 mm de base inferior y de 3.8 mm de diámetro superior, y una altura de 12.7 mm, perforado por su eje longitudinal con un orificio de 1.58 mm de diámetro.

Seis malla metálicas en forma de disco No 14 que ajustan en el interior del cilindro.

Manómetro con sensibilidad de 1 mm.

Agujas y/o brocas de 1.00mm para perforar el orificio en muestra.

Tuberías flexibles para conexiones.

Compactador tipo Army, con una masa de 0.5 Kg y una altura de caída de 350mm.

Probetas graduadas de 250 ml y 100 ml

Cronometro

Tamiz No 10

Agua destilada

Espátula

Gravilla de granulometría comprendida entre los tamices No10 y No 14.

### **Preparación de la Muestra**

#### **Suelo alterado y contenido de humedad**

- Retirar del suelo las partículas de arena y agrava mayores a 2 mm de diámetro.
- Determinar el contenido de humedad, ajustar la humedad adicionando agua destilada

#### **Muestra alterada pulverizada y secado al aire**

- Retirar todas las partículas de arena y grava mayores a 2 mm de diámetro o tamiz No 10.

- Adicionar agua destilada para brindarle al suelo 2 puntos por encima de la humedad requerida.
- Compactar el suelo usando el dispositivo.
- Retirar la muestra compactada del molde y almacenar la muestra en bolsas herméticas durante 24 horas

### **Muestras alteradas**

- Cortar la muestra de 40 mm de longitud para que ingrese en la posición correcta.
- Sellar el perímetro de la parte superior de la muestra con arcilla o masillas impermeables para evitar el flujo de agua entre la muestra y la pared del cilindro.

### **Método y procedimiento**

#### **Método A**

Compactar la probeta de 40 mm de largo dentro del cilindro de la prueba, con la muestra restante hallar el contenido de humedad de la muestra. La compactación se realiza con el dispositivo tipo Army, con el cual se deben hacer 12 ascensos con una masa de 0.5 kg.

Insertar el cono guía en la parte superior, ejerciendo presión. Luego insertar la aguja por el cono y se presiona hasta atravesar la probeta. Realice unos giros antes de retirar la aguja esto para tener un buen orificio.

Ubique dos mallas en la parte de enfrente y posterior y agregue las gravillas previamente lavadas. Y ubicar las dos mallas restantes sobre los extremos del cilindro

Ajustar las dos placas mediante los tornillos y garantizar un cierre hermético del dispositivo.

Ubicar el dispositivo en forma horizontal y acoplarlo al dispositivo de medición de agua.

Se comienza con una cabeza hidráulica de 50mm de presión, y se registra el tiempo de inicio. Registrar los volúmenes de agua recogidos al cabo de dos, cuatro, cinco, seis, ocho y diez minutos así como el estado de turbidez del agua. Si al momento de iniciar la prueba no hay indicios de la salida del fluido detener la prueba y revisar la muestra.

Empezamos con una cabeza hidráulica de 50mm de presión durante 5 min, si el efluente que ha salido es oscuro y el caudal a estado entre los valores de 1.0 a 1.4 ml/s la prueba esta completa. Desmunte el aparato y corte transversalmente la muestra, compare el diámetro de orificio, si este es mayor dos veces mas que el de la aguja utilizada para abrirlo se clasifica este suelo como altamente dispersivo - D1-

Si el efluente que sale de la cabeza hidráulica de 50 mm de presión es claramente oscuro y su caudal de salida no varia en tre 1.0 ml/s durante los primeros 5 min, adiciones 5 más, si al final el efluente sigue saliendo oscuro deténgase y determine el tamaño del agujero, si este supera en 1.5 veces mas el diámetro de la aguja se clasifica como arcilla dispersiva –D2-.

Si al terminar los 10 min y el efluente ligeramente oscuro y su caudal es de 0.4 a0.8 ml/s aumente la cabeza hidráulica a 180 mm pre presión, si el efluente es claramente oscuro y el caudal a aumentado de 1.4 2.7 ml/s, deténgase y examine el tamaño del agujero, si este se encuentra entre 1.5 y 2 veces el diámetro de la aguja clasifique el suelo como arcilla moderadamente dispersiva -ND4-

Si con la presión hidráulica en 180 mm el efluente sale claro o con algunas partículas y después de 5 min continua con un caudal de 0.4 a0.8 ml/s eleve la presión a 380 mm, si el efluente se ha oscurecido y el caudal se ha aumentado

entre 1.8 a 3.2 ml/l deténgase y clasifique el suelo como ligeramente dispersivo – ND3-.

Si después de 5 min y una presión hidráulica de 380 mm e efluente es completamente claro y el caudal es de 1.0 a 1.80 ml/s eleve la presión hidráulica a 1020, si después de los 5 min el efluente es ligeramente oscuro y el caudal es mayor 3.0 ml/s clasifique el suelo como no dispersivo -ND2-. Puede considerarse suelo no dispersivo ND1. Los suelos ND1 bajo presiones de 1020 mm generalmente tienen un caudal menor que 3.0 ml/s y al examinar el agujero este no se ha alargado.

### **Método B**

Los procedimientos para el método B son similares a los realizados para el método A, exceptuando las siguientes especificaciones en los criterios para clasificar las características de la dispersión en la muestra.

Los suelos que proveen efluentes oscuros o moderadamente oscuros y el tamaño del agujero es superior a 1.5 veces el diámetro de la aguja bajo una presión hidráulica de 50 mm se clasifica como D

Los suelos que producen un efluente ligeramente oscuro y que el agujero de 1.5 veces mayor con una presión hidráulica de 180 mm a 380 mm se clasifica como arcilla ligeramente dispersiva SD

Si los flujos no presentan turbidez y partículas a penas visibles, y el diámetro no es mayor a 1.5 veces el diámetro de la aguja y la presión hidráulica se incrementa más de 380 mm se clasifica como arcilla no dispersiva ND.

### **Método C**

Los procedimientos son similares a los realizados en el método A, exceptuando las siguientes modificaciones para los criterios de clasificación de la muestra.

Los suelos que producen un efluente oscuro y moderadamente oscuro con un caudal de flujo de 1.0 a 2.8 ml/s por debajo de los 180 mm de presión durante 5 min se clasifican como ND4

Los suelos que producen un efluente poco oscuro con caudales de 2.4 a 3.2 ml/s con 380 mm de presión durante los 5 min se clasifican como ND3

Los suelos que producen efluentes poco oscuros y un caudal de 1.6 a 2.4 ml/s con una altura de 380 mm durante 5 min se clasifican como ND2

Los suelos que producen efluentes muy claros con un caudal de 1.8 a 1.6 ml/s con presiones de más de 380 durante 5 min se clasifican como ND1.

### **Muestras Inalteradas.**

El procedimiento es el mismo en los diferentes métodos, solo se dificulta ubicar el cono guía debido a la compactación natural del suelo, así que se realiza el procedimiento con mayor fuerza, de no se posible utilizar solo la aguja tratando de garantizar el sentido longitudinal de orificio. Es importante anotar todos los caudales y la forma que toma el orificio en su sección transversal, debido a que en este tipo de muestras pueden variar considerablemente.

### **Tablas**

Las siguientes tablas nos ayudan a la toma de datos durante el desarrollo del laboratorio y la clasificación del suelo de acuerdo al método que se uso.



**Tabla 6. Clasificación de suelo según el método de desarrollo.**

Criterio de Evaluación para Resultado de ensayo Pinhole Método A						
Clasificación dispersividad	Cabeza	tiempo	caudal final ml/s		turbidez	φ agujero mm
D1	50	5	1,0 - 1,4	oscuro	muy oscuro	≥ 2
D2	50	10	1,0 - 1,4	Moderadamente oscuro	oscuro	>1,5
ND4	50	10	0,8 - 1,0	ligeramente oscuro	Moderadamente oscuro	≈ 1,5
ND3	180	5	1,4 - 2,7	poco visible	ligeramente oscuro	≈ 1,5
	380	5	1,8 - 3,2			
ND2	1020	5	> 3,0	claro	claro	<1,5
ND1	1020	5	< 3,0	perfectamente claro	perfectamente claro	1


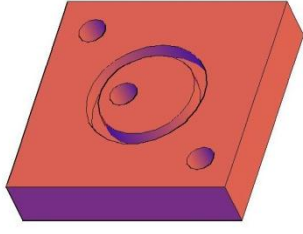
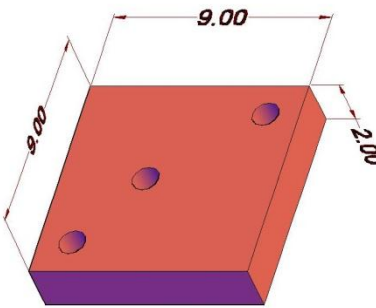

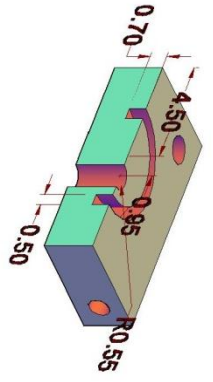
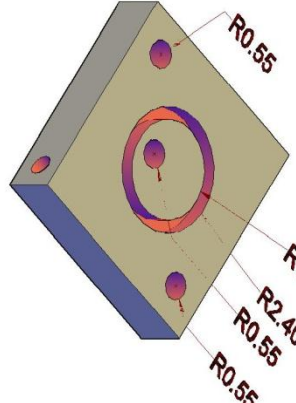
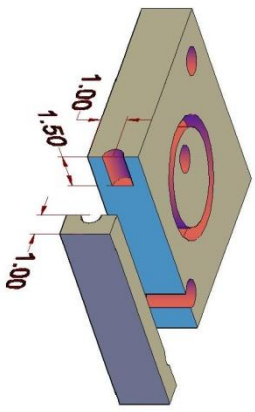
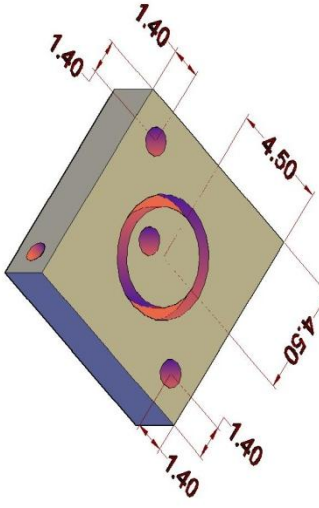
Criterio de Evaluación para Resultado de ensayo Pinhole Método B						
D	50	10	--	ligeramente oscuro o oscuro	muy oscuro o moderado	≥ 2
SD	180-380	5	--	Bastante visible	ligeramente claro	>1,5
ND	380	5	--	Claro	Bastante visible.	≈ 1,5





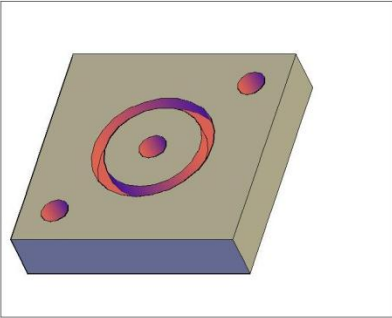
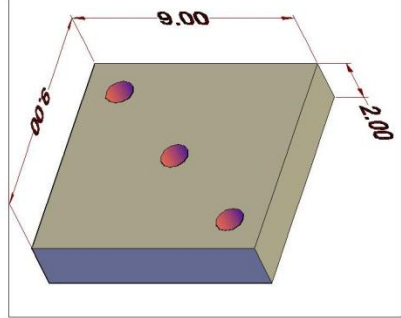
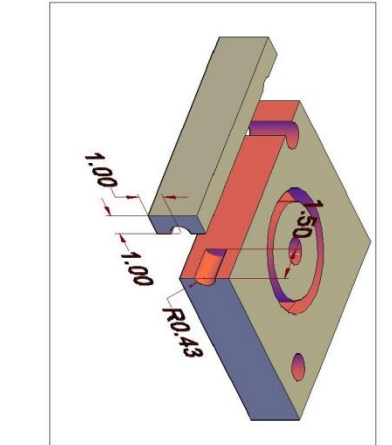
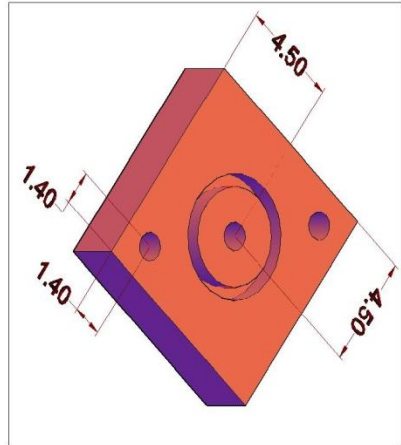
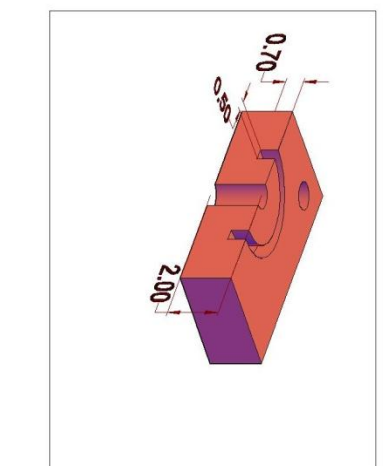
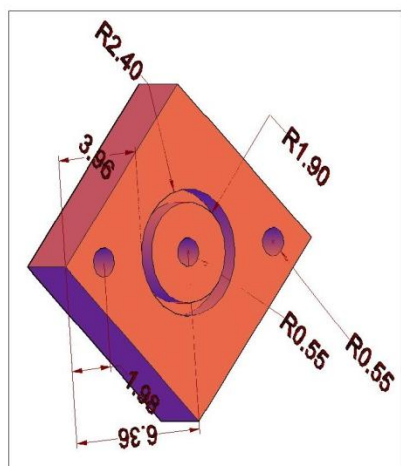
# ANEXO D

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

 <p>UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</p>																				
 <p>Facultad de Ingeniería</p>																				
<p>CONTROL DE MODIFICACIONES</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NO.</th> <th>FECHA</th> <th>DESCRIPCION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	NO.	FECHA	DESCRIPCION																	
NO.	FECHA	DESCRIPCION																		
<p>REQUISITOS DE DISEÑO</p> <p>ESTRUCTURAL, MECANICA Y DE FABRICACION</p>	<p>CONTROL DE FABRICACION</p>	<p>INFORMACION DE REFERENCIA</p> <p>PROYECTO: ...</p>																		



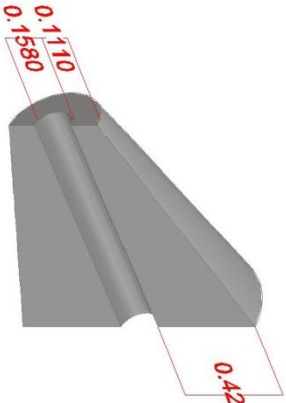
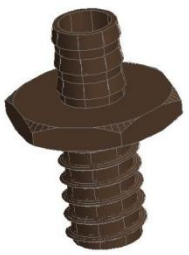

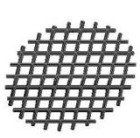
# ANEXO E

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

<p>UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA</p>																	
<p>INGENIERIA EN ELECTRONICA ESCUELA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA</p>																	
<p>CONTROL DE MODIFICACIONES</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NO.</th> <th>FECHA</th> <th>DESCRIPCION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	NO.	FECHA	DESCRIPCION														
NO.	FECHA	DESCRIPCION															
<p>REQUISITOS DE MATERIALES</p> <p>1. ALUMINIO 6061-T6 2. ACERO INOXIDABLE 304</p>	<p>CONTENIDO</p> <p>1. DISEÑO DE LA PIEZA 2. FABRICACION DE LA PIEZA</p>	<p>INFORMACION DE IMPRESION</p> <p>FECHA: 2023-08-15 HORA: 10:30 AM LUGAR: LABORATORIO DE DISEÑO</p>															

# ANEXO F

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

<p>    <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>   <small>Facultad de Ingeniería</small>   <small>INGENIERIA</small>   <small>Escuela de Ingeniería</small> </p>	 <p>ESC 5:1</p>	<p><b>CONTROL DE MODIFICACIONES</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NO.</th> <th>FECHA</th> <th>DESCRIPCION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	NO.	FECHA	DESCRIPCION										 <p>ESC 5:1</p>	<p><b>RESPONSABILIDADES DE DISEÑO</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NO.</th> <th>FECHA</th> <th>DESCRIPCION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p><b>CONTENIDO</b></p> <p><b>DISEÑO SCIENTIFICO DE LABORATORIO FINICO</b></p>	NO.	FECHA	DESCRIPCION										 <p>ESC 1:1</p>	 <p>ESC 1:1</p> <p>Tornillo de 3/8</p>	<p><b>INFORMACION DE REFERENCIA</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NO.</th> <th>FECHA</th> <th>DESCRIPCION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	NO.	FECHA	DESCRIPCION										 <p>ESC 1:1.5</p>
NO.	FECHA	DESCRIPCION																																										
NO.	FECHA	DESCRIPCION																																										
NO.	FECHA	DESCRIPCION																																										