

Erosión interna y dispersividad: estado del arte y revisión de ensayos

Internal Erosion and dispersivity: state of the art and test review

Diego Escudero Merino^{1*} y José Manuel Martínez Santamaría²

Palabras clave

erosión interna;
dispersividad;
ensayos;
pinhole;

Sumario

La erosión interna es una de las principales causas de fallo en las presas de materiales sueltos, en concreto, es la segunda causa más común tras el desbordamiento. Este fenómeno está muy condicionado por el comportamiento de las arcillas, que son utilizadas como material de control de filtraciones por su baja permeabilidad. Cierta tipo de arcillas, por sus propiedades físico-químicas, tienen un comportamiento inestable en contacto con el agua. Las partículas de arcilla se separan unas de otras entrando en suspensión en el medio acuoso, sin que este esté en movimiento. El principal problema es que al entrar en suspensión, las grietas existentes pueden progresar, facilitando la filtración y por ende provocando fallos de sifonamiento, fugas concentradas, etc.

Las arcillas dispersivas son suelos frecuentes en la naturaleza, pero son difíciles de identificar con los ensayos habituales como las granulometrías, los límites de Atterberg, etc. Y aunque útil, la identificación en campo no es lo suficientemente precisa. Por esta razón, existen ensayos específicos para identificar los suelos dispersivos y la susceptibilidad a ser erosionados. Los principales son: Crumb test, SCS dispersion test (o doble hidrómetro), análisis de sales disueltas en el agua intersticial y el Pinhole. Existen otros, aunque mucho menos utilizados, como el ensayo dilución-turbidez (dilution-turbidity test) o el cilindro rotatorio.

Keywords

internal erosion;
dispersivity;
tests;
pinhole;

Abstract

Internal erosion is a major cause of failure in embankment dams, specifically, is the second common cause after overtopping. This phenomenon is strongly influenced by the behavior of clays, which are used as seepage control material for its low permeability. Some types of clay, by their physicochemical properties, have unstable behavior in contact with water. Clay particles separates each other going into suspension in the aqueous medium, without this is moving. The main problem is that going into suspension, the cracks can progress, facilitating filtration and consequently failures of piping, concentrated leaks, etc.

Dispersive clay soils are common in nature, but are difficult to identify with standard tests such as grain size, Atterberg limits, etc. Field identification is useful, although not precise enough. For this reason there are specific tests to identify dispersive soils and susceptibility to be eroded. Principals are: Chemical test, Crumb test, Soil conservation service test (or double hydrometer test) and Pinhole test. There are other although less used, like dilution-turbidity test or rotating cylinder test.

1. INTRODUCCIÓN

La erosión interna se produce cuando las partículas de suelo se desprenden y son transportadas por el flujo de agua a través del cuerpo de presa o de su cimentación. Al fluir el agua a través del suelo produce un estado de fuerzas. Por un lado, la que desestabiliza las partículas, fuerza de arrastre debido a la energía hidráulica, y, por otro, las que se oponen al arrastre: el peso, la cohesión, el rozamiento y el bloqueo entre partículas.

La erosión interna, según las estadísticas de daños y accidentes recogidas por ICOLD hasta 1995, es la segunda causa de fallo más frecuente tras el desbordamiento en presas de materiales sueltos. Suele producirse en los primeros llenados, debido a que: se somete por primera vez a la carga

hidráulica, a los primeros ciclos de llenado y vaciado, a que el material aún no está consolidado, etc.

Habitualmente el inicio de la erosión exige la coincidencia de tres requisitos: que el material sea susceptible, es decir, que sea internamente inestable o que sea de un tamaño incompatible con el filtro; que exista un estado tensional con muy baja presión efectiva, prácticamente nula, denominado estado tensional crítico; y que haya una carga hidráulica suficiente como para arrastrar las partículas por un elevado gradiente hidráulico o alta velocidad de flujo.

Para este trabajo se han agrupado los mecanismos de inicio en tres tipos: La erosión por fugas concentradas, que exigen la presencia de grietas; el levantamiento de fondo, que exige un sifonamiento en el pie; y la pérdida o arrastre de finos, en el cual los finos no pueden ser retenidos por la matriz gruesa. Esta a su vez se divide en erosión de contacto, sufusión y pérdida de finos remontante. En el último boletín de ICOLD sobre este tema se consideran estos mismos mecanismos pero agrupados de otra manera. Erosión

^{1*} Corresponding author: diegoescuderoimerino@gmail.com
Investigador independiente.

² Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Madrid, España.

por fugas concentradas, erosión remontante, erosión de contacto y sufusión.

2. MECANISMOS DE INICIO

2.1. La erosión por fugas concentradas (*Concentrated leaks*)

Es un mecanismo que se inicia en grietas abiertas en las que el flujo de agua es capaz de erosionar las paredes de la grieta desprendiendo partículas y arrastrándolas. Por ello es un mecanismo propio de suelos plásticos o limos parcialmente saturados, capaces de soportar la grieta abierta.

Hay muchas formas de que se produzcan agrietamientos, pero las más comunes son consecuencia de los asentamientos diferenciales, con orígenes diferentes (fracturación hidráulica, mala compactación, desecación, etc). Pero no siempre que hay una grieta tiene que producirse erosión en ella, puede que las paredes no sean capaces de sostenerse o que los gradientes no sean lo suficientemente importantes como para arrastrar las partículas.

Por tanto, además de la minimización y detección de grietas, es importante precisar la tasa de erosión y la tasa de ampliación que lleve a la que la erosión progrese. Para conseguir esto, es necesario conocer la tensión de corte crítica de las paredes de la grieta, es decir, el esfuerzo de corte para el cual se inicia la erosión.

Los ensayos disponibles para determinar la resistencia al corte crítica y, por tanto, para reproducir este tipo de erosión son: Hole Erosion Test (HET), Submerged Jet Erosion Tests (JET), Cilindro rotatorio y el Erosion Function

Apparatus (EFA) entre otros. Los detalles de estos ensayos se tratarán más adelante.

Un caso particular es el de los suelos dispersivos. La erosión también se desencadena en una grieta que ya existe como en las fugas concentradas, pero no necesitan un esfuerzo de corte inducido por el flujo de agua para que se desprendan las partículas. Las partículas se separan químicamente, por repulsión electrostática.

Las arcillas tienen una interacción particular con el agua. La forma en la que se unen las distintas capas, enlaces secundarios, hace que sean capaces de adsorber agua y cationes y fijarlos a su superficie y a los espacios interlaminares.

Esos cationes al entrar en contacto con un medio acuoso se desprenderán hasta equilibrar las concentraciones con él. Formando así una nube de cationes y aniones que se denomina Doble Capa Eléctrica difusa (DCED)

Dependiendo de los cationes presentes en la arcilla y, por tanto, de los que formen la capa doble, esta tendrá un tamaño mayor o menor. Si los cationes son sodios, hará falta más cantidad para reequilibrar y la doble capa será mayor que si fueran cationes calcio o magnesio. (figura 1(a)).

Pero también influirá el medio acuoso. En medios poco salinos la capa doble será mayor, ya que el medio tendrá más querencia sobre ellos. (figura 1(b)).

Que la capa doble sea mayor hace que las fuerzas de repulsión entre ellas separen más las partículas, aumentando la distancia y disminuyendo más las atractivas, fuerzas de Van der Waal's. El balance entre ambas fuerzas será el que gobierne la dispersión, (figura 2).

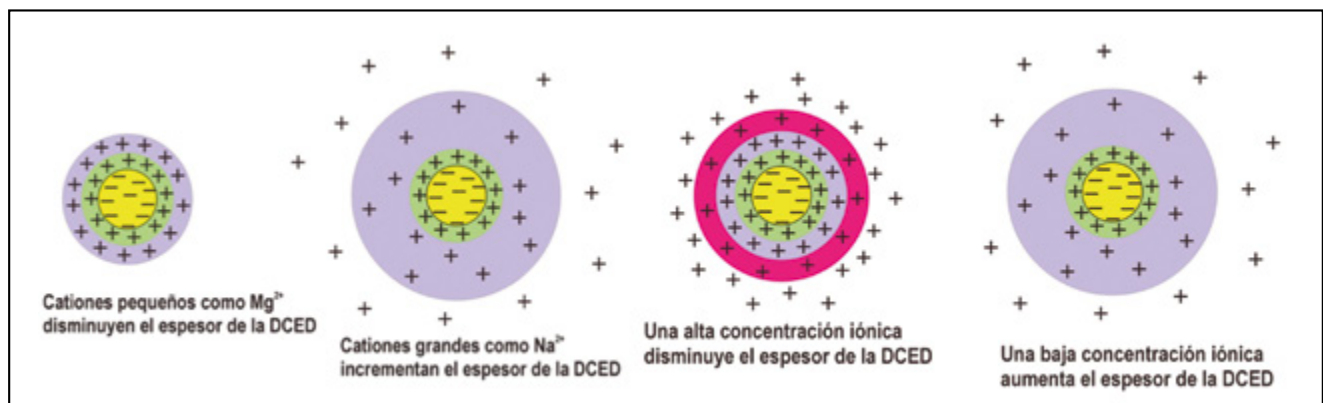


Figura 1. Comparación de DCED según cationes que la forman y según salinidad del medio acuoso (Apunte De Santiago, C. Máster CEDEX 2014).

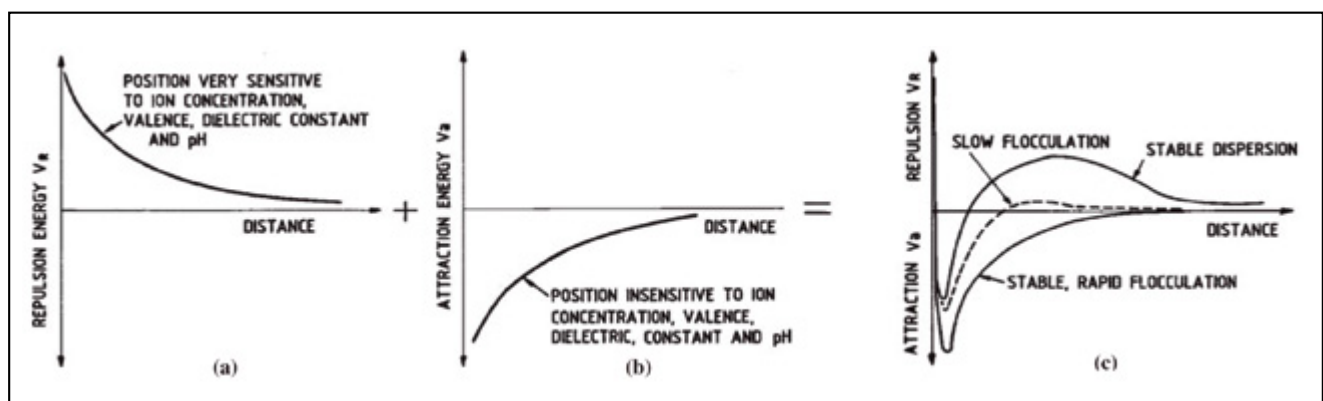


Figura 2. Curvas de las fuerzas de repulsión (a), las de Van der Waals (b) y la energía neta (c). (Fell et al, 2005).

Por lo tanto, los suelos dispersivos son aquellos que en presencia de un medio acuoso, con flujos muy lentos o nulos, separan sus partículas por una defloculación química, repulsión electrostática. Entrando las partículas en suspensión. Son suelos con altos contenidos de ion sodio (Na^+).

La identificación de esta característica de las arcillas es fundamental debido que las arcillas son un material básico en la construcción de este tipo de estructuras. Para esta labor se usan ensayos específicos, ya que la dispersividad es una característica que no puede detectarse directamente con los ensayos de identificación habituales como granulometría, límites de Atterberg, etc., ni tampoco puede ser correlacionada con otros parámetros de una forma suficientemente fiable. Es cierto que algunos autores establecen ciertas pautas que suelen cumplir. Mitchell (1993) indica que es una característica propia de arcillas de media y baja plasticidad, CL y CL-CH en la clasificación de Casagrande. En la misma línea, Sherard et al (1976) además apuntaron que era necesario un porcentaje de al menos 10% de partículas menores a 5 μm para que un suelo fuera susceptible a la erosión por dispersión.

Los ensayos para identificar y cuantificar la dispersividad son principalmente: los análisis químicos, el crumb test, el doble hidrómetro o SCS test y el pinhole. Aunque existen otros menos habituales como el dilución-turbidez, crumb test mejorado o el ensayo de hinchamiento libre.

2.2. El levantamiento de fondo (*heaving*)

Es un tipo de erosión remontante, es decir, progresará hacia aguas arriba de la presa generalmente por la cimentación.

Es propia de suelos de muy baja plasticidad, a efectos prácticos con índices de plasticidad menores a 7. Necesita de una capa de suelo cohesivo que haga de techo y mantenga el conducto abierto.

El proceso comienza en una superficie libre, ya sea el lecho del río o el pie erosionado, donde se produce sifonamiento. Se produce un levantamiento que permite un aumento de la filtración formando pequeños canales. Estos canales se irán erosionando hasta formar un conducto más ancho. Una vez alcance el embalse, comenzaría a ensancharse y a erosionarse invirtiendo el sentido, hasta la rotura y arrastre de la presa.

Para este tipo de erosión los ensayos no están generalizados y existe alguna experiencia como la de Richards y Reddy (2014) basada en la energía cinética.

2.3. Pérdida o arrastre de finos

Es el mecanismo basado en la falta de estabilidad de un suelo sometido a un gradiente hidráulico y asociado a que su estructura granulométrica no es capaz de retener la fracción más fina. Distinguiendo entre:

Sufusión, se produce cuando un flujo de agua atraviesa un suelo internamente inestable. La fracción gruesa no es capaz de retener la fracción fina, quedándose al descubierto y teniendo que soportar la presión efectiva.

Se produce en suelos con falta de tamaños de partículas intermedios.

La sufusión implica poco o ningún cambio de volumen. Lo que sí aumenta es la permeabilidad que a su vez incrementa la velocidad de flujo, lo que conlleva un mayor arrastre de partículas y un aumento de la tasa de sufusión hasta que la matriz gruesa no es capaz de soportar el peso y colapsa. (figura 3).

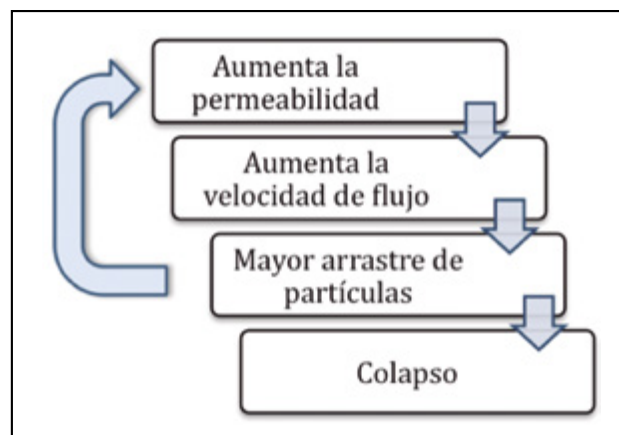


Figura 3. Consecuencias de la sufusión (Escudero, D., 2014).

No existen ensayos generalizados, pero se han desarrollado varios dispositivos, sobre todo en Francia. Son el Triaxial Erodimeter test y Oedo-permeameter test principalmente.

La **Erosión de contacto** (*contact erosion*) se produce cuando una capa de suelo grueso está en contacto con una capa de suelo fino y hay un flujo paralelo al contacto. Si los huecos de la capa gruesa lo permiten, las partículas finas son arrastradas por ellos dejando un hueco. Este vacío podrá colapsar propagándose hasta la superficie formando una chimenea, o podrá no colapsar dejando una zona débil en la que comience una tubificación, o puede producir una inestabilidad por deslizamiento.

Y por último el **arrastre de finos remontante**: Es propio de núcleos inclinados o con fuerte pendiente que no están protegidos convenientemente con un filtro.

Se produce a elevados gradientes hidráulicos que pueden darse muy localizados en los contactos entre el núcleo y el espaldón. Las partículas se separan del núcleo y son arrastradas aguas abajo por el espaldón, formando un conducto, que progresará hacia aguas arriba si se mantiene el gradiente.

3. ENSAYOS

3.1. Ensayos de fugas concentradas y dispersividad

Estos ensayos, se basan en determinar cuál es la tensión de corte que produce un flujo de agua y cuál es la tasa de erosión. Los principales son: Hole Erosion Test (HET), Submerged Jet Erosion Tests (JET), el cilindro rotatorio y el Erosion Function Apparatus (EFA)

Hole Erosion Test (HET)

El primer desarrollo de este ensayo fue de Lefebvre et al (1984), pero el que se usa en la actualidad es el de Wan y Fell (2004).

Permite reproducir procesos de tubificación (*piping*) al someter a las paredes de un orificio al flujo de agua bajo distintos escalones de gradiente hidráulico, registrando las variaciones de flujo, el tamaño final del orificio y la pérdida de masa.

Su resultado es la tasa de erosión y la tensión de corte crítica. Da una idea de la facilidad con la que se erosiona un suelo, en las condiciones habituales de una grieta.

Este ensayo no solo revela bajo qué condiciones se desencadena la erosión, sino también cómo es el proceso erosivo completo, con otros fenómenos habituales como la ampliación del conducto, las obstrucciones de este o la socavación de la entrada y la salida.

El ensayo se realiza sobre una muestra cilíndrica, en la que se perfora por su eje, un orificio de 6,35 mm (2,5"), por el que se hace pasar el flujo, bajo escalones de carga hidráulica constante. Se aumentarán los escalones de carga hasta que se observe que la erosión no solo se inicia, sino que progresa. Puede ocurrir que la erosión se inicie, pero que la tensión aplicada disminuya al aumentar el diámetro del conducto, por la reducción de la velocidad, y se establezca el flujo. En ese caso, habrá que aumentar la carga hidráulica.

Una vez progrese la erosión, se mantendrá el ensayo en ese escalón de carga, tanto tiempo como el flujo pueda mantenerse constante (habitualmente se mantiene 45 minutos).

A parte de poder definir la tasa de erosión y la tensión de corte ejercida, se puede definir el índice de tasa de erosión, I_{HET} , con el que Wan y Fell (2004) establecieron una clasificación de la velocidad de progresión de la erosión interna, (tabla 1).

Tabla 1. Descripción del índice de la tasa de erosión. (ICOLD, 2013 tomada de Wan, 2006, traducida por los autores)

Categoría	Índice de tasa de erosión I_{HET}	Descripción
1	<2	Extremadamente rápido
2	2-3	Muy rápido
3	3-4	Moderadamente rápido
4	4-5	Moderadamente despacio
5	5-6	Muy despacio
6	>6	Extremadamente despacio

Es un ensayo delicado de realizar, que funciona bien en suelos de resistencia intermedia. Los suelos muy débiles se verán afectados muy pronto por colapsos o socavaciones de la entrada o la salida sin dejar que se desarrolle por completo. Y los suelos muy duros necesitan de altas cargas hidráulicas que no todos los laboratorios pueden conseguir. Además, es complicado de realizar con suelos con bajo porcentaje de arcilla porque el orificio no se sostiene y colapsa. Por todo ello, es complicado de realizar con éxito, sin anomalías.

Otra desventaja que presenta este ensayo está relacionada con la dificultad de conocer el diámetro del agujero en cualquier momento de la prueba. Este dato es necesario para estimar la naturaleza del flujo (laminar o turbulento), que repercute directamente en las ecuaciones del coeficiente de fricción y, por tanto, en la tasa de erosión y en la tensión crítica.

Submerged Jet Erosion Test (JET)

Esta prueba fue desarrollada por la Unidad de investigación de Ingeniería Hidráulica del Servicio de Investigación Agrícola de los EE.UU. y está normalizado por la ASTM D5852-00(2007).

Es una prueba que puede realizarse tanto en campo como en laboratorio.

El fenómeno que reproduce es una erosión por impacto como la que ocurre en lluvias torrenciales o desbordamientos.

Este ensayo se basa en el impacto de un chorro de agua a presión que barre la superficie de una muestra de suelo sumergida en agua, durante habitualmente dos horas, provocando una serie de orificios.

Como en el ensayo HET se registrará la pérdida de volumen de suelo, pero en este caso por unidad de volumen para así establecer la facilidad con la que el suelo es erosionado, la tasa de erosión.

Al igual que realizaron Wan y Fell (2004) con el HET, Hanson estableció una clasificación de la erosionabilidad de los suelos basada en el valor de k_d , tasa de desmoronamiento, (tabla 2).

El ensayo JET es más versátil. Permite mayor rango de resistencia de suelos y con menos cantidad de finos, ya que no necesita que ningún orificio se mantenga abierto. Por todo ello es menos delicado de realizar.

Tabla 2. Descripción cualitativa de la erosionabilidad del ensayo JET. (Hanson, 2001)

K_d (ft/h)/(lb/ft ²)	Descripción
>10	Extremadamente erosionable
1-10	Muy erosionable
0,1-1	Moderadamente erosionable
0,01-0,1	Moderadamente resistente
0,001-0,01	Muy resistente
<0,001	Extremadamente resistente

Cilindro rotatorio

Descrito por Chapuis (1986a,b), además de usarse para evaluar la tasa de erosión y la tensión de corte, este ensayo se ha usado para evaluar la dispersividad, Heinzen y Arulanandan (1977).

Se basa en la inducción de una tensión de corte en una probeta cilíndrica de suelo a través del giro de una célula concéntrica, que puede girar a distintas velocidades.

El hueco entre la célula y la muestra se rellena con el fluido de erosión que preferiblemente será agua destilada. Mientras la muestra se queda quieta, el cilindro gira transmitiendo el esfuerzo de corte a través del agua, permitiendo evaluar la tasa de erosión y la tensión de corte crítica. Se obtiene así la función de erosión comparando el esfuerzo torsor (la tensión crítica) con la pérdida de peso de la muestra tras los distintos ciclos de giro.

Además, al establecer la tensión crítica, se puede definir la frontera entre el carácter dispersivo y la floculación.

El problema de este ensayo es su poco uso y las pocas referencias a él en la literatura. Ha sido desplazado por el resto de ensayos.

Erosion Function Apparatus

Fue desarrollado por Briaud et al (1999, 2001a, 2001b) para establecer la profundidad de socavación en la cimentación de puentes.

Este ensayo también permite establecer la tasa de erosión (mm/h) y la tensión de corte crítica de una muestra sometida a un flujo de agua.

Aunque puede usarse en cualquier tipo de suelo, es más habitual su uso con suelos finos.

El ensayo se basa en someter a una muestra de suelo a un flujo de agua, reproduciendo un proceso erosivo superficial.

El dispositivo consta de un conducto con un caja rectangular transparente, en la cual se introduce la muestra. Esta está provista de una abertura en su parte inferior que se ajusta al diámetro del tomamuestra, habitualmente un tipo Shelby, que gracias a una junta tórica, sella completamente el dispositivo. La muestra se extruye del tomamuestras quedando dentro del conducto de flujo, (figura 4 y figura 5).

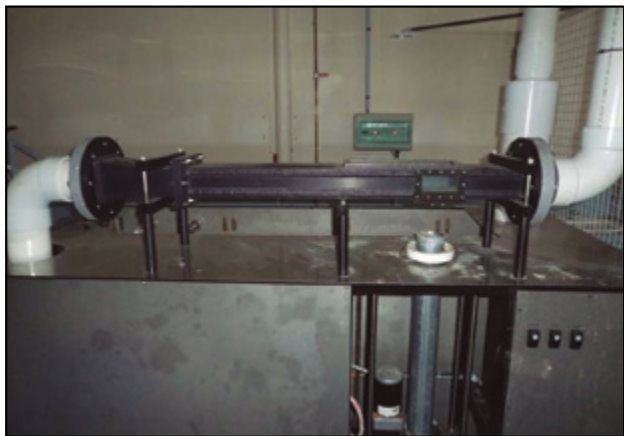


Figura 4. Dispositivo perteneciente al ESPT (Bennabi et al, 2012).

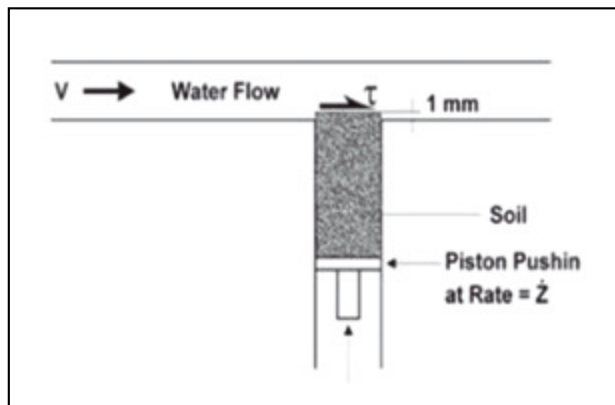


Figura 5. Esquema de colocación de la muestra (Briaud, 1999).

La tensión de corte crítica se obtendrá con un primer escalón: Se comienza con un flujo a muy baja velocidad, en el rango de 0,1 m/s a 0,6 m/s, y se va incrementando hasta el momento en el que empieza la erosión. Esa será la velocidad crítica que corresponderá a la tensión de corte crítico.

A partir de ese momento, se proseguirá con los escalones de velocidad constante, habitualmente entre 5 y 8. En cada escalón se registrará el tiempo que tarda en erosionarse un milímetro de muestra, obteniendo un punto que permitirá estimar la erosionabilidad según la categorización que estableció el propio Briaud (2008), (figura 6 y figura 7). Una vez se ha erosionado, se desmontará el tubo y se extruirá otro milímetro para realizar el siguiente escalón.

De esta manera, se obtendrán varios puntos de la función de erosión, que relaciona la tasa de erosión (mm/h) y la velocidad de flujo o la tensión de corte.

Este ensayo tiene ciertas desventajas:

En primer lugar la forma de registrar la tasa de erosión. Es el operador el que establece cuándo se ha erosionado como media un milímetro de muestra a través de la

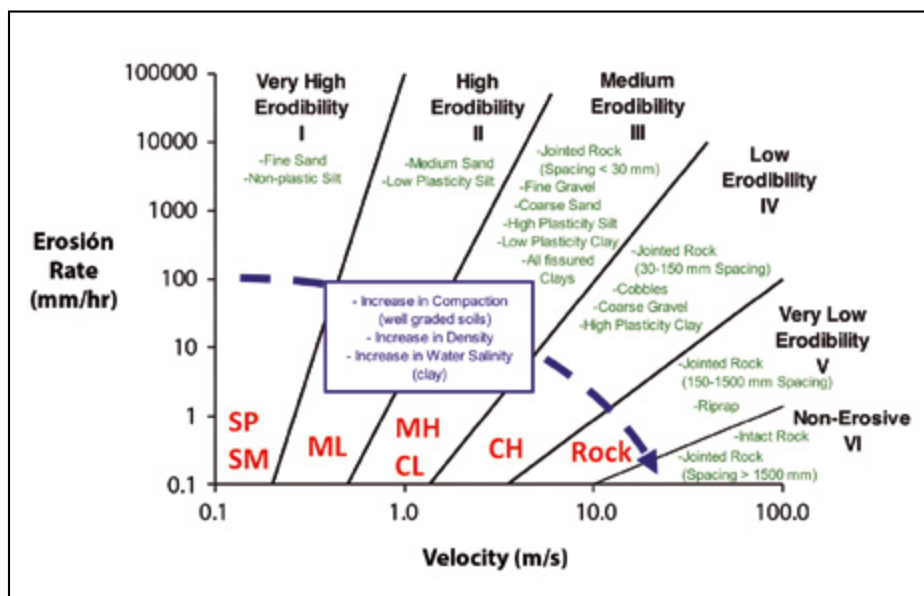


Figura 6. Categorías de erosión propuestas para suelos y rocas según la velocidad (Briaud, 2008).

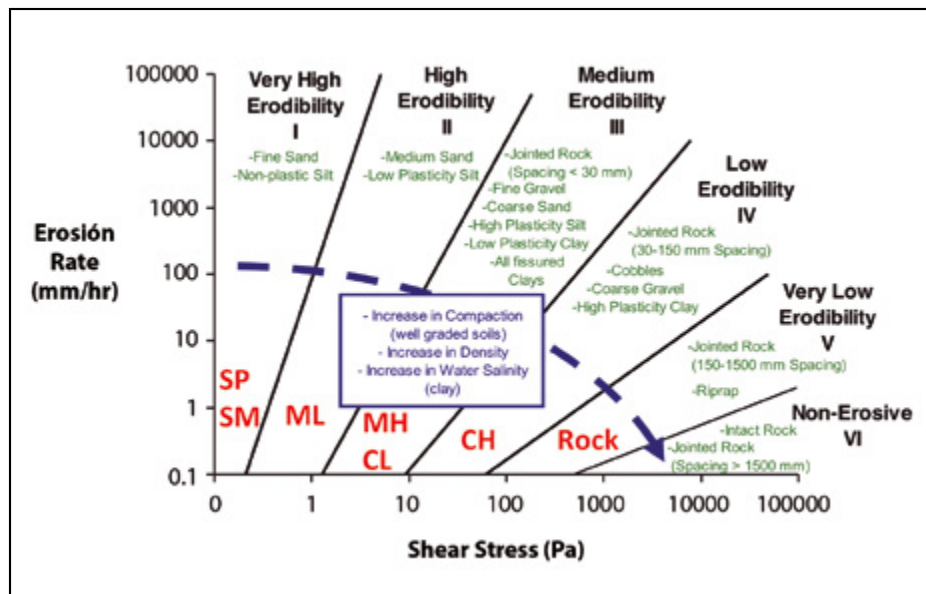


Figura 7. Categorías de erosión propuestas para suelos y rocas según la tensión de corte (Briaud, 2008).

inspección visual. Esto es complicado ya que la erosión en suelos finos es irregular.

Y en segundo lugar para poder establecer la tensión de corte a través de la velocidad de flujo es necesario calcular o estimar un factor de fricción. Esta estimación se suele hacer a través de la tasa de erosión lo cual, como ya se ha comentado, también es fuente de cierta incertidumbre.

Por todas ellas Briaud et al (2003) considera una precisión del 10% en la tasa de erosión y en la tensión de corte.

Pero tiene ciertas ventajas respecto a los otros ensayos que determinan la tasa de erosión y la tensión de corte, como por ejemplo el HET o el JET: en principio, la muestra es inalterada, por lo que se mide la erosionabilidad in situ. Permite realizar ensayos en suelos con bajos porcentajes de arcilla que con el HET es muy complicado debido que el orificio colapsa. Además, el mecanismo de erosión superficial es más cercano al real con respecto al JET.

Como ya se comentó antes, la identificación de la dispersividad exige ensayos específicos. Los tradicionalmente usados son: ensayos químicos de sales disueltas, doble hidrómetro o SCS test, Crumb test y Pinhole.

Ensayos químicos en sales disueltas

Están orientados a conocer la cantidad de catión Sodio, íntimamente ligado con el comportamiento dispersivo.

Por un lado, están los que se realizan sobre las muestras de suelo: el porcentaje de sodio intercambiable (ESP)

se define como el cantidad de sodio intercambiable en relación a la capacidad de intercambio catiónico. Es decir, la concentración de cationes sodio, potasio, calcio y magnesio, (Ecuación [1]), considerándose dispersivo para valores mayores del 10%; y la Relación de sodio intercambiable (ESR), que es la relación entre el sodio y el resto de cationes presentes en la muestra, (Ecuación [2]), coloca la frontera en el 15%.

$$ESP = \frac{Na^{+} \text{ intercambiable}}{CIC} \cdot 100 = \frac{Na^{+} \text{ intercambiable}}{Na^{+} + K^{+} + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \cdot 100 \quad [1]$$

$$ESR = \frac{Na^{+} \text{ intercambiable}}{CIC - Na^{+}} \cdot 100 = \frac{Na^{+} \text{ intercambiable}}{K^{+} + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \cdot 100 \quad [2]$$

Por otro lado, están los que se realizan al agua intersticial: Índice de absorción de sodio o SAR definido en la (Ecuación [3]) considerada que con valores mayores de 2% es altamente dispersivo. Por último, porcentaje de sodio. Es similar al porcentaje de sodio intercambiable, (Ecuación [4]) sus límites fueron desarrollados por Sherard en los setenta en el desarrollo del Pinhole, (figura 8).

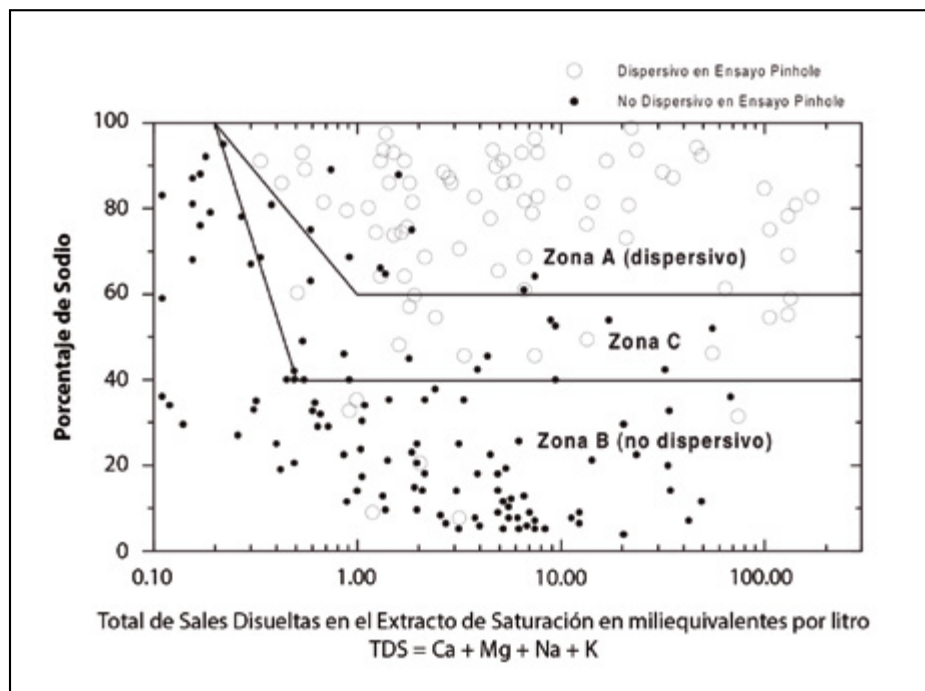


Figura 8. Correlación entre el porcentaje de sodio y el Pinhole. (Escudero, D., 2014 tomada de Sheppard et al, 1975).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}} \quad [3]$$

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de sodio} &= \frac{Na}{TDS} \cdot 100 = \\ &= \frac{Na^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \cdot 100 \end{aligned} \quad [4]$$

Todos ellos son sencillos y rápidos incluso algunos pueden realizarse en campo, pero pueden verse afectados por diversos factores como pH, mineralogía, química del agua del embalse, etc... por lo que ganarán en precisión y utilidad cuando sus límites hayan sido calibrados con ensayos más precisos.

Crumb Test

Fue desarrollado como ensayo de campo, pero debido a su sencillez fue adoptado también por los laboratorios. Consiste en sumergir una muestra cúbica, secada al

aire a temperatura ambiente, en 250ml de agua y observar cómo reacciona. Tras unos tiempos normalizados, se observará la tendencia de las partículas de arcilla a formar una suspensión coloidal que enturbie el agua. Dividiendo la reacción en 4 grados. Desde el grado uno, donde no hay reacción las partículas caen al fondo sin enturbiar el agua, comportamiento no dispersivo; al grado cuatro en el cual las partículas forman una nube coloidal que se apodera de todo el agua, comportamiento fuertemente dispersivo.

Doble Hidrómetro o SCS Test

O porcentaje de dispersión, consiste en realizar dos granulometrías por sedimentación a la fracción menor de 5 μm . Una de ellas con un dispersante (habitualmente hexametáfosfato de sodio) y agitación mecánica y otra sin ello. Se calcula la tasa, o el porcentaje de dispersión, como la cantidad medida sin dispersante entre la cantidad medida con dispersante, (figura 9). Está recogido en la norma ASTM D4221-11

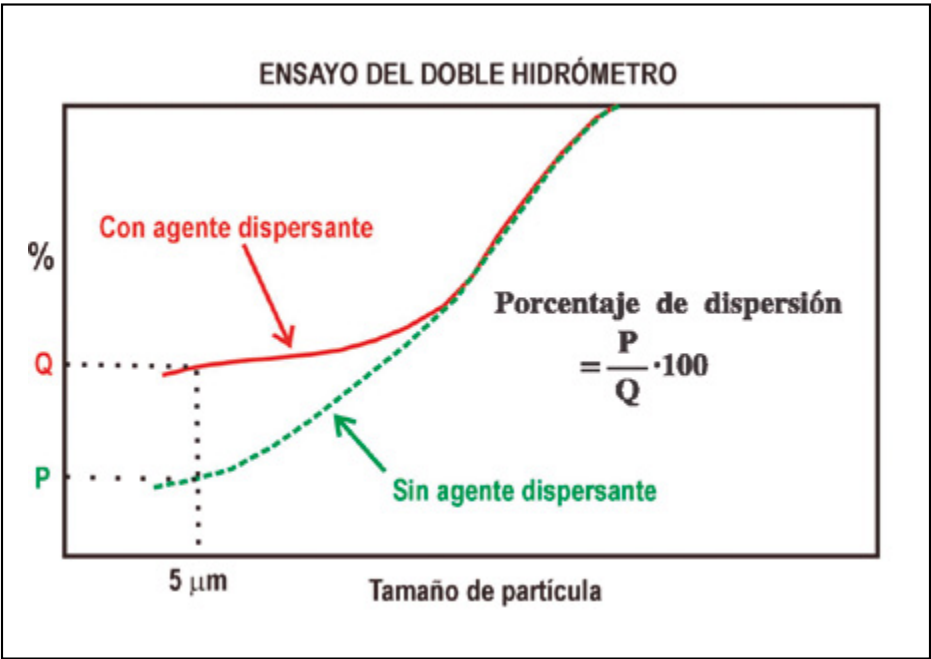


Figura 9. Diferencia entre las curvas granulométricas resultado de cada hidrómetro. (Manual de Diseño, Construcción, Explotación y Mantenimiento de balsas, 2009).

Existen varios criterios, algunos incluso tienen en cuenta el tipo de suelo pero el más habitual es (tabla 3).

Tabla 3. Categorías propuestas por Bell y Maud (1994)

Porcentaje de dispersión	Carácter
< 15%	No dispersivo
15% - 30%	Ligeramente dispersivo
30% - 50%	Moderadamente dispersivo
> 50%	Altamente dispersivo

Pinhole

El Pinhole es el ensayo principal utilizado para la identificación de la dispersividad. Identifica directamente la erosionabilidad, no por mediadas químicas o tensionales como el resto. Lo hace porque simula el flujo a través de una grieta. Fue desarrollado por Sherard et al (1976) y está recogido por numerosas normas como, ASTM-D4647-06 o NLT 20791.

Consiste en hacer pasar un flujo de agua a través de un orificio de 1 mm a distintas cargas hidráulicas, y manteniéndolas un tiempo normalizado. Se mide la turbidez, la velocidad de flujo o caudal, y el tamaño final del orificio para poder enmarcarlo en una de las categorías recogidas en la tabla 4 .

Conocer la carga hidráulica y el diámetro del orificio permite, como refieren Heinzen y Arulanandan (1977), calcular la tensión de corte, siempre y cuando, entre otras hipótesis, se considere un flujo laminar. Otra de las principales ventajas de este ensayo es la sencillez del equipo y la facilidad de preparación de la muestra.

Desde el desarrollado por Sherard et al (1976) el ensayo ha sufrido actualizaciones. Cabe señalar la realizada por Indraratna et al (2008), de la Universidad de Wollongong, Australia, que, basándose en el principio de funcionamiento del equipo tradicional, han desarrollado el “Aparato de Simulación del Proceso de Falla por Erosión Interna”, más conocido como PSAICE.

El diagrama de funcionamiento de este aparato se muestra en la figura 10. La peculiaridad con la que cuenta es la sofisticación de los sistemas de medida. Tiene dos transductores de presión, uno a la entrada y otro a la salida para medir la variación en la presión; un turbidímetro o medidor electrónico de la turbidez; y un depósito colector, con una balanza electrónica. Todo está conectado a un receptor de datos que permite un registro continuo y a tiempo real del índice de erosión.

Esta sofisticación facilita la toma de medidas y la calibración, además de permitir el cálculo de la tasa de erosión y la función de erosión gracias a la medición de la masa perdida en el efluente.

Tabla 4. Categorías del ensayo Pinhole. (Sherard et al, 1976b)

Categoría	Clasificación según el resultado	Descripción del resultado del ensayo
Suelo dispersivo	D1	Falla rápidamente bajo una carga hidráulica de 50 mm. (2")
	D2	Falla bajo una carga hidráulica de 50 mm (2")
Suelo intermedio	ND4	Falla lentamente bajo una carga hidráulica de 50 mm (2")
	ND3	La erosión se produce lentamente bajo una carga hidráulica de 180mm (7") o ligeramente sobre 380mm (15").
Suelos no dispersivos	ND2	Ligera erosión bajo 380mm o 1020mm de carga hidráulica. (erosión no coloidal)
	ND1	No hay erosión bajo 1020mm (40") de carga hidráulica.

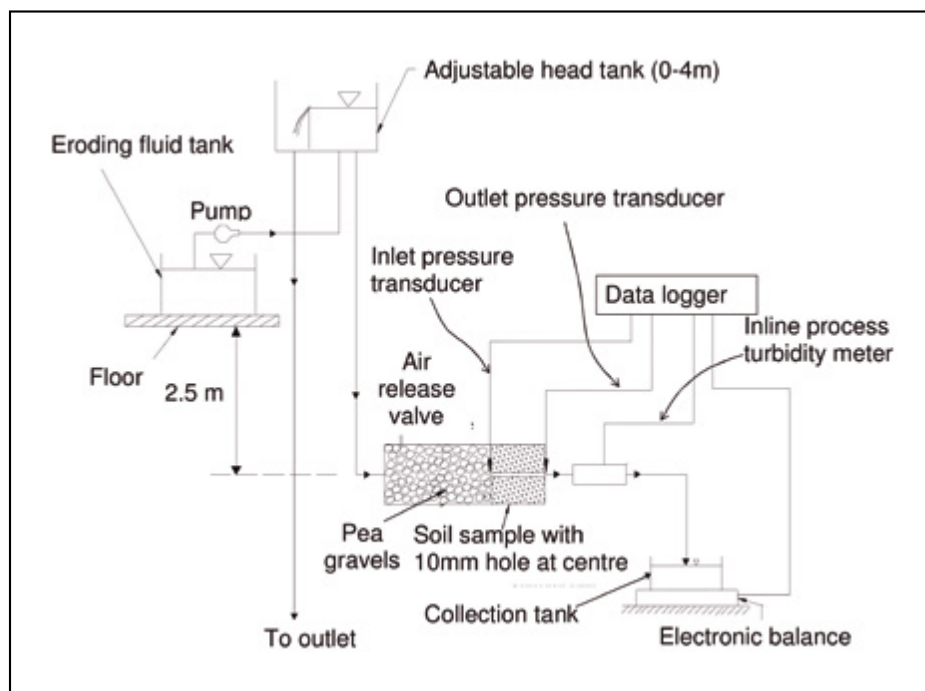


Figura 10. Esquema del aparato de simulación del proceso de falla por erosión interna. (Indraratna et al, 2008).

Ensayo de dilución-turbidez

Aunque mucho menos usado, este ensayo, también permite identificar los suelos dispersivos con gran sencillez.

Desarrollado por el SCS a finales de los años sesenta, es esencialmente como el doble hidrómetro, pero simplificado para poder ser usado en campo y obtener los resultados más rápidamente.

Se basa en conseguir diluir una disolución de muestra, dispersante y agua hasta conseguir la misma turbidez que una disolución de solo agua y muestra. El parámetro que permite clasificar el suelo es la relación entre el volumen final, una vez diluido, y el volumen inicial. Cuanto más bajo sea este, el comportamiento de la muestra de forma natural será más parecido a cuando se le añade dispersante, reflejando un carácter dispersivo.

Decker y Dunningan (1977) asignan carácter altamente dispersivo a valores entre 1 y 2, y comportamiento no dispersivo cuando es igual o mayor que 9.

Enhanced Crumb Test

Y por último el crumb test mejorado desarrollado en el IFSTTAR (*"Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'aménagement et des Réseaux"*) por Haghighi et al (2012).

Pretende que puedan obtenerse resultados cuantitativos con más precisión gracias a una modificación del equipo y del protocolo.

Está basado en registrar la evolución temporal de la geometría de una probeta, sumergida en agua. Tanto su variación horizontal, como vertical. Se registra gracias a dos cámaras, una que graba el plano cenital y otra el perfil, transmitiendo las imágenes a un ordenador, (figura 11). Mediante un algoritmo se calcula la variación de la geometría gracias al contraste entre la muestra y el fondo, (figura 12).

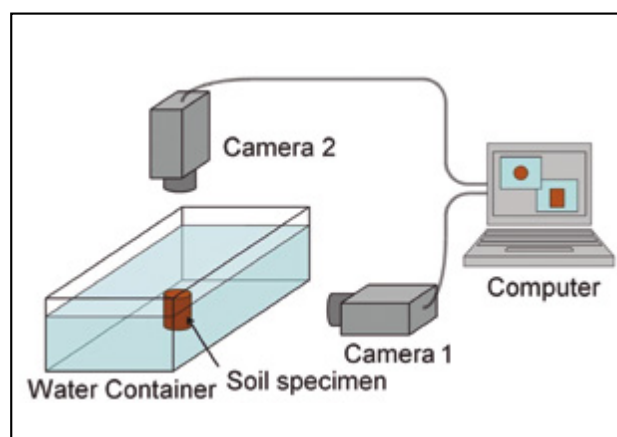


Figura 11. Disposición general del dispositivo (Haghighi et al, 2012).

Siempre es preferible que el análisis se haga con la cámara de perfil, ya que la nube de partículas que se puede formar en la superficie del agua puede influir en las imágenes de la cenital. El dispositivo se completa con un tanque rectangular, con las paredes rectas para evitar las distorsiones y con las paredes opuestas a las cámaras pintadas, para favorecer el contraste con la muestra y delimitar con mayor precisión la frontera.

Los resultados que proporciona este ensayo son la variación, en el tiempo, de los parámetros que definan la geometría: Altura, Diámetro y Volumen.

Con este ensayo también se observa el mecanismo general del suelo. En una primera fase la muestra se hincha, según van saturándose los poros, debido a las fuerzas de succión. Hasta que en el equilibrio de fuerzas, las de succión, no son suficientes para contrarrestar la repulsión electroquímica entre las DCED y se entra en una segunda fase llamada desmoronamiento y desplome. Trozos de muestra caen hasta formar una pirámide cónica. Esta evolución puede observarse en la figura 12.

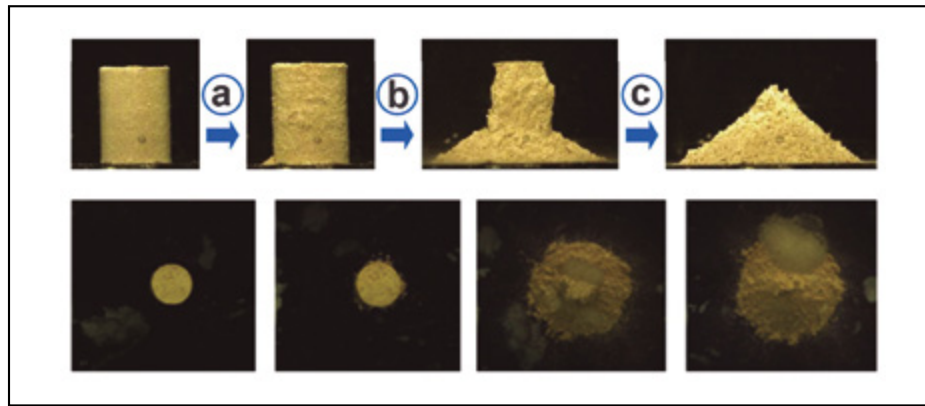


Figura 12. Evolución de la muestra (Haghighi et al, 2012).

3.2. Ensayos de erosión remontante

No existen ensayos específicos generalizados, pero sí experimentos que tienen como fin conocer el modelo físico, como los de Deltares. Cabe destacar el trabajo de Richards y Reddy (2014) y el uso de la energía cinética crítica como parámetro análogo a la tensión de corte crítica.

Estos autores establecieron el equilibrio límite en una partícula en esfuerzos de torsión apoyándose en la teoría de Sharma et al (1992) que afirma que las partículas al ser arrastradas, ruedan cuando se ven afectadas por las fuerzas hidrodinámicas. Demostrando que la fuerza entre partículas es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido.

Para llegar a la expresión de la energía cinética crítica (Ecuación [5]), utilizaron también la ley de conservación de la energía en ese momento de inicio de la erosión, siendo un medio bifásico (agua y partículas), en el que si aumenta la energía de las partículas porque se han desplazado, tendrá que reducirse la energía cinética del fluido.

$$E_{C,crit} = \frac{1}{2} \cdot M_f \cdot v_c^2 = \zeta \cdot F \quad [5]$$

donde M_f es la masa del fluido en Kg; v_c la velocidad crítica en m/s; F es la fuerza entre partículas; y ζ un factor geométrico que depende de las características del suelo.

De esta ecuación también se puede deducir que sólo se requiere un cambio en la energía cinética de la filtración para superar la resistencia de la unión entre partículas y que se inicie la erosión remontante.

Para cuantificar esta energía cinética crítica Richards y Reddy usaron el "True Triaxial Piping Test Apparatus" (TTPTA). Es una célula cúbica de 2,54mm (1") de placas de aluminio capaz de generar una presión de confinamiento diferente en los tres ejes principales, además de ser capaz de introducir una filtración con una presión de poro controlada. Se detalla con más precisión en Richards y Reddy (2010).

Con este dispositivo fueron capaces de establecer la velocidad real de filtración, Ecuación 6, a partir de la velocidad de Darcy medida directamente en el TTPTA como caudal de filtración entre área de la muestra. Y con ella obtener la energía cinética.

$$v_s = \frac{q}{A_v} = \frac{v \cdot A}{A_v} = \frac{v \cdot A}{n \cdot A} = \frac{v}{n} \quad [6]$$

Con los valores de la energía cinética crítica, con la cual se inicia la erosión, obtenidos en el laboratorio y con los resultados de modelos o las tomas de datos en campo se puede establecer el factor de seguridad de este tipo de erosión.

3.3. Ensayos de sufusión

Más que ensayos al uso para identificar qué suelos pueden verse sometidos a sufusión, son dispositivos utilizados para entender mejor cómo se desarrolla este mecanismo de erosión.

El primero de ellos es el **Oedo-permeameter Volume Erosion Test** cuyo dispositivo, es el Oedo-permeameter. Fue desarrollado por Marot et al (2010). Permite someter a una muestra, sujeta a un flujo, a escalones de gradiente hidráulico, y medir: la turbidez, las partículas que salen con el efluente, las deformaciones axiales, el flujo y la densidad media.

El aparato que aparece en la figura 13, consta de una célula de Plexiglas equipada con 12 puertos de presión colocados en dos series verticales enfrentadas. Además existen otros dos dispositivos de presión uno en el contacto superior de la muestra y otro en el sistema de drenaje.

El efluente sale de la célula por un tubo de cristal para poder medir la turbidez con un sensor óptico. Y es recogido en un sistema colector que permite interceptar las partículas finas.

El pistón tiene un recorrido de 200mm para adaptarse a los asientos que pueda sufrir la muestra que se medirán con un LVDT.

El sistema hidráulico está provisto de una bomba y un caudalímetro que mide el flujo que entra por la parte superior de la célula.

Y por último, un sistema gamma-densitométrico desarrollado por Alexis et al (2004), compuesto por una fuente radiactiva de rayos gamma y un contador de centelleos en el lado opuesto de la célula. Este sistema está montado en un carro móvil para recorrer la dirección vertical midiendo la densidad media de la muestra.

Con todos estos datos y las ecuaciones energéticas del desarrollo de Marot et al (2011b) se puede llegar a una caracterización de la sensibilidad a la erosión y a un índice de resistencia a la erosión.

El otro es el **Triaxial Volume Erosion Test**. Consiste en una célula triaxial modificada para hacer pasar un flujo de agua con una carga hidráulica controlada. Para ello tiene un controlador de presión para la inyección de flujo, independiente del que suministra la presión de confinamiento.

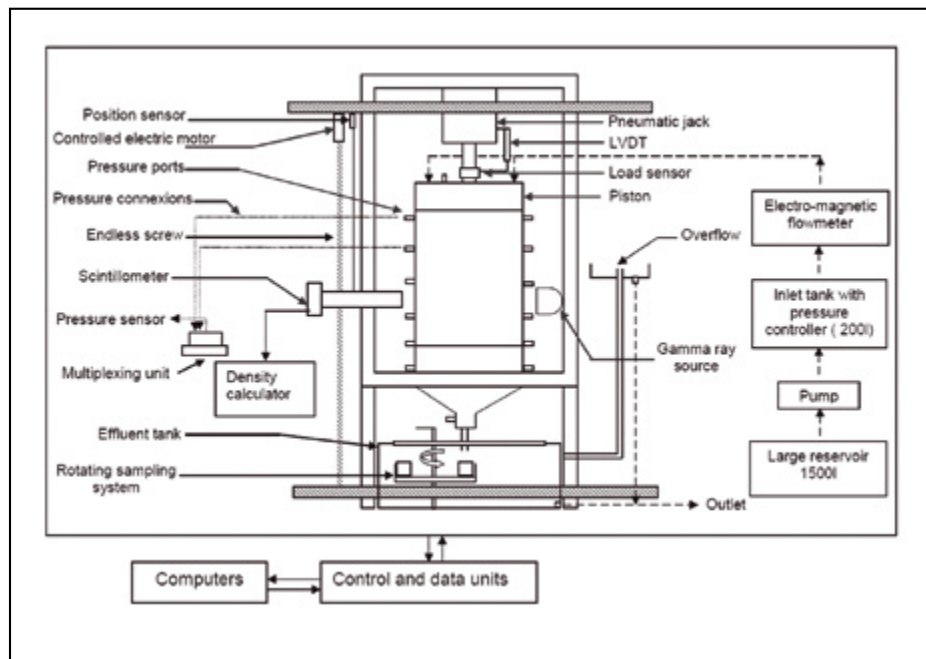


Figura 13. Oedo-permeámetro (Sail et al, 2011).

Estos además permiten registrar el volumen inyectado y las variaciones de presión. Para una descripción más detallada Bendahmane et al, (2008). (figura 14 (a)).

Igual que el Oedo-permeámetro, tiene un sistema novedoso de medida de partículas en el efluente. En este caso, es un sensor óptico multicanal desarrollado por Marot et al (2011a) y esquematizado en la (figura 14 (b)). Está compuesto por cuatro emisores LED asociados a otros tantos receptores que permiten medir la transparencia del efluente y con ello la concentración de finos que hay en este. Lo novedoso es que es capaz de registrar concentraciones imperceptibles para el ojo humano mediante la diferencia de voltaje.

Con la interpretación de estos datos junto con los cambios en los volúmenes de flujo inyectados, que permiten establecer la conductividad hidráulica de la muestra, se puede establecer cuándo se inicia y cómo progresa el proceso erosivo.

Al igual que con el oedo-permeámetro, el análisis de estos resultados de masa de erosión con las ecuaciones energéticas de Marot et al (2011b), se puede caracterizar la sensibilidad y la erosión del suelo y establecer el índice de resistencia a la erosión.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se pretendía hacer un repaso actualizado por los ensayos existentes para identificar y cuantificar la erosión interna. Esta es la segunda causa de fallos en las presas de materiales sueltos y, por tanto, es necesario tenerla en cuenta a la hora de proyectar, construir y explotar una presa.

Existen diferentes tipos de erosión según distintos criterios como: los materiales que se vean afectados, las zonas donde se produzca, etc. Por las peculiaridades que tienen cada uno, existen ensayos mejor enfocados a cada cual.

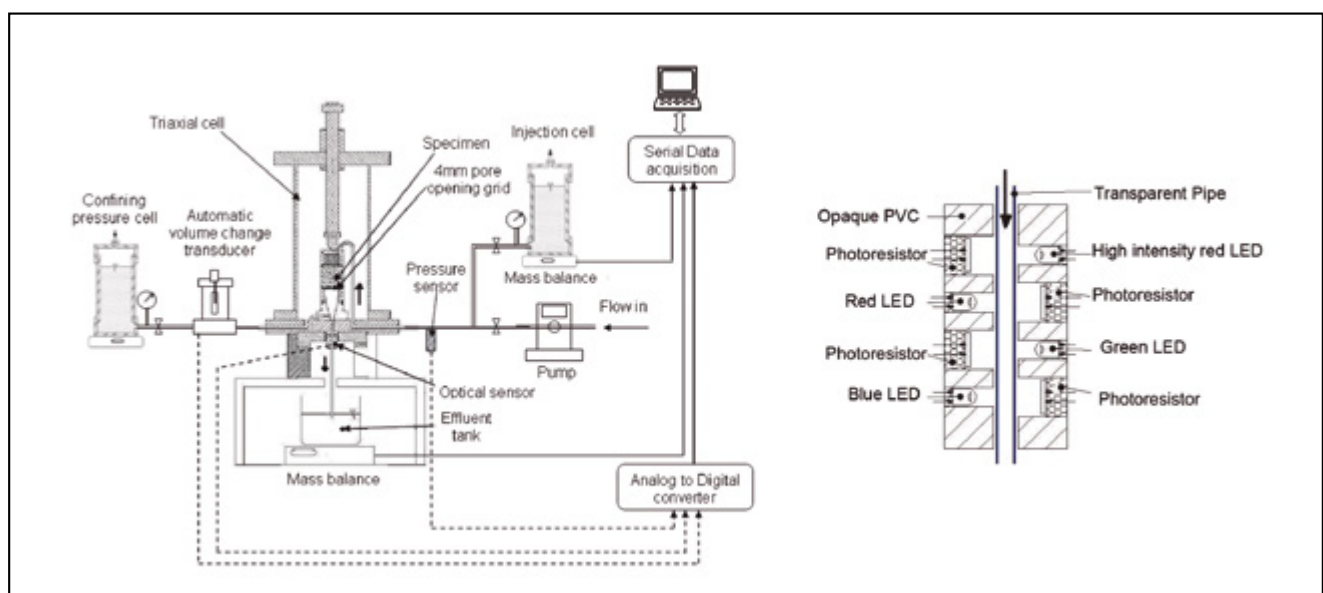


Figura 14. Diagrama esquemático de: (a) triaxial erodímetro (Bendahmane et al., 2008) y (b) Sensor óptico multicanal (Marot et al., 2011a).

En primer lugar, los ensayos de erosión por fugas concentradas reproducen procesos erosivos superficiales. Tienen en común que buscan establecer la tasa de erosión y la tensión de corte crítica, con la que se inicia la erosión. Pero cada uno tiene sus particularidades.

El ensayo HET es el que mejor reproduce el modelo físico, pero es un ensayo delicado de realizar. Poco conveniente con porcentajes bajos de finos. Existen otros como el JET y el EFA. Ambos reproducen un efecto de erosión superficial, uno por impacto y el otro por arrastre, pero son menos delicados de llevar a cabo. Como se puede ver en los trabajos de Wahl (2010) y Bennabi (2012) al comparar los resultados del HET con el JET y el EFA respectivamente comparten la capacidad de clasificar los suelos de más a menos erosionables de manera similar, pero cuantitativamente sí existen diferencias. Ambos presentaban tensiones de corte e índices de tasas de erosión más elevados para los mismos suelos.

En cuanto a los ensayos de dispersividad, la fiabilidad de los cuatro ensayos principales está basada en gran cantidad de estudios realizados en presas que han fallado o que han tenido daños por culpa de la erosión y en presas que son resistentes a la erosión. Además, han sido comparados en multitud de estudios y, en general, presentan resultados similares.

Son las discrepancias entre ellos, y como se recoge en el sumario del simposio sobre arcillas dispersivas recogido por Sherard y Decker (1977), las que hacen que el Pinhole sea considerado como el más fiable, debido a que simula mucho mejor el proceso erosivo, no solo la dispersividad. Además está más extendido y hay mucha más literatura sobre él.

En cuanto a los otros dos, el dilución-turbidez es un ensayo muy sencillo y rápido, que puede hacerse en campo, pero del que apenas hay referencias. Y el crumb test mejorado parece que puede ser el futuro, es más sofisticado, pero hay poca experiencia sobre él.

Para la erosión remontante existen muy pocos parámetros y ensayos específicos. El trabajo de Richards y Reddy (2014) y el parámetro de la energía cinética crítica, aún está muy reciente y su uso no está muy extendido. Además, necesita un dispositivo específico, el "True Triaxial Piping Test Apparatus" (TTPTA).

Por último, con los ensayos de sufusión ocurre lo mismo. Ciertamente hay más literatura sobre ellos, pero aún no se han generalizado. Y de la misma forma necesitan dispositivos para nada generalizados.

5. BIBLIOGRAFÍA

Consultada

Benahmed, N., Philippe, P., Royet, P., Tourment, R., Van den Ham, G., Van Beek, V. (2012). Internal erosion "Action 3.1. FloodProBE addresses Technologies for Improved Safety of the Built Environment in Relation to Flood Events. WP03-01-12-05.

Bennabi A., Karoui T., Benamar A. y Wang H.Q. (2012). *Some elements of comparison between two laboratory devices for soil erosion testing*, ICSE6, Paris, August 27-31, p.1089-1096.

Crim, S., Parker, F., Melville, J., Curry, J. y Goven. O. (2003). *Erosion Characteristics of Alabama soils Obtained with the Erosion Function Apparatus and Correlations with Classification Properties*, Report 930-490, Alabama Department of Transportation, Montgomery, Alabama.

Escudero, D. (2014). *Erosión interna y dispersividad. Estado del arte y revisión de ensayos*. Trabajo fin de máster (Máster en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica). Madrid. CEDEX-UNED, 2014. 134p.

Haghighi I., Martin T., Reiffsteck P. y Chevalier, C. (2012). *An Enhanced Crumb Test for better characterizing water sensitivity of soils*, 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, France.

ICOLD (2013). *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations*. Bulletin 164, Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment" International Commission on Large Dams.

Marot, D., Sail, Y. y Alexis A. (2010). *Experimental bench for study of internal erosion in cohesionless soils*, 5th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-5), San Francisco, USA, 7-10 November 2010, p. 418-427.

Nguyen, H. H., Marot, D. y Bendahmane, F. (2012). *Erodibility characterisation for suffusion process in cohesive soil by two types of hydraulic loading*, 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, France.

Richards, K. S. y Reddy, K. R. (2014). *Kinetic Energy Method for Predicting Initiation of Backward Erosion in Earthen Dams and Levees*. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol.20, No.1, pp:85-97.

Sail Y., Marot D., Sibille L. y Alexis A. (2011). *Suffusion tests on cohesionless granular matter*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 15, N°5, pp.799-817. Doi: 10.3166/ejece.15.799-817.

Sherard, J.L. y Decker, R.S. (1977). Eds., *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion Geotechnical Projects*, STP 623, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.

Mencionada:

Alexis A., Le Bras G. y Thomas P. (2004), *Experimental bench for study of settling-consolidation soil formation*, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 27, n° 6, p. 557-567.

American Society Testing Materials. ASTM D4221-11, *Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer*, ASTM International, West Conshohocken, PA, EE.UU. 2011. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/D4221.htm>

American Society Testing Materials. ASTM D4647-06: *Standard Test Method for Identification and Classification Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test*. EE.UU. 2013. 11 p. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/D4647.htm>

American Society Testing Materials. ASTM D5852-00(2007): *Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method*. EE.UU. 2007. 5 p. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/D5852.htm>

American Society Testing Materials. ASTM D6572-13e1, *Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test*, ASTM International, West Conshohocken, PA, EE.UU. 2013. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/D6572.htm>

Bendahmane, F., Marot D. y Alexis A. (2008). *Parametric study of suffusion and backward erosion*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(1): 57-67. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:1(57).

Briaud, J.-L. (2008). *Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees*. *J. Geotech. Geoinviron. Eng., ASCE*, 134(10), 1424 - 1447.

- Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W. y Kwak, K.W. (2001a). *Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions*. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127. No. 2. February 105-113.
- Briaud, J.-L., Ting, F., Chen, H.C., Gudavalli, R., Perugu, S. y Wei, G. (1999). *SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers*. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125. No. 4. April 237-246.
- Briaud, J.-L., Chen, H.C., Kwak, K.W., Han, S.W. y Ting, F. (2001b). *Multiflood and Multilayer Method for Scour Rate Prediction at Bridge Piers*. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127. No. 2. February 114-125.
- Briaud, J.-L., Chen, H.-C., Li, Y., Nurtjahyo, P. y Wang, J. (2003). *Complex Pier Scour and Contraction Scour in Cohesive Soils* – NCHRP Report 24-15 – USA.
- Chapuis, R.P. (1986a). *Use of rotational device on cohesive soils*. Transportation Research record 1089.
- Chapuis, R.P. (1986b). Quantitative measurement of the scour resistance of natural soil clays. Canadian Geotechnical Journal, 23, 132-141.
- Decker, R. S. y Dunningan, L. P. (1977). *Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test*. Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J.L. Sherard and R.S. Decker, Eds., ASTM, pp. 94-109.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D. y Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis Group plc, London, UK. ISBN 04 1536 440 x.
- Heinzen, R. T. y Arulanandan, K. (1977). *Factors influencing Dispersive Clay and Methods of Identification*. Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J.L. Sherard and R.S. Decker, Eds., ASTM, pp. 202-217.
- ICOLD (1995). *Dam Failures Statistical Analysis*. Bulletin 99, International Commission on Large Dams, Paris.
- Indraratna, B., Muttuvel, T. y Khabbaz, H. (2008). *Investigating Erosional Behaviour of Chemically Stabilised Erodible Soils*. Papers of the Faculty of Engineering of Wollongong, Australia 2008. Recuperado de <http://ro.uow.edu.au/engpapers/421>
- Marot D., Bendahmane F. y Konrad J.M. (2011a). Multichannel optical sensor to quantify particle stability under seepage flow. *Canadian Geotechnical Journal*, 48: 1772-1787. doi:10.1139/T11-074.
- Marot D., Regazzoni P.L. y Wahl T. (2011b). *An energy based method for providing soil surface erodibility rankings*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (ASCE), doi: 10.1061(ASCE) GT.1943-5606.0000538.
- Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, EEUU. 1st Edition
- Richards, K. S. y Reddy, K. R. (2010). *True Triaxial Piping Test Apparatus for evaluation of piping potential in earth structures*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 33, No. 1, pp. 83-95.
- Ryker, N. L. (1977). *Encountering Dispersive Clays on Soil Conservation Service Projects in Oklahoma*. Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J.L. Sherard and R.S. Decker, Eds., ASTM, 1977, pp. 370- 389.
- Sharma, U. M., Chamoun, H., Sita Rama Sarma, D. S. H. y Schechter, R. S. (1992). *Factors controlling the hydrodynamic detachment of particles from surfaces*. Journal Colloid Interface Science, Vol. 149, No. 1, pp. 121-134.
- Sherard, J. L., Dunningan, L. P., Decker, R. S. y Steele, E. F. (1976b). *The Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, Vol. 102, No. Gt1, Jan. 1976, pp. 69-85.
- Sherard, J. L. y Decker, R. S. (1977). *Summary evaluation of Symposium*. Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J.L. Sherard and R.S. Decker, Eds., ASTM, 1977, pp. 467-479.
- Sherard, J. L., Decker, R. S., Dunningan, L. P. y Steele, E. F. y Steele, E. F. (1976a). *Identification and nature of dispersive soils*. J. Geotech. Eng. ASCE, Vol. 102 No. GT4, pp. 277-301.
- Sherard, J. L., Dunningan, L. P., Decker, R. S. y Steele, E. F. (1975). *Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils*. Proceedings of American Society for Civil Engineers, Vol. 102. N° GT8, Aug. 1975.
- Wahl, T. L. (2010). *A comparison of the hole erosion test and jet erosion test*. Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, Las Vegas, NV.
- Wan, C.F. (2006). *Experimental investigation of piping erosion and suffusion of soils in embankment dams and their foundations*. PhD thesis, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Wan, C.F. y Fell, R. (2004). *Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams*. Geotechnical Testing Journal, vol.27, No.3, pp. 295-303.

Madrid M-30 M-Río
FIDIC Awards 2014 "Outstanding Project of the Year"



Conexión de Alta Velocidad Ferroviaria
Atocha-Chamartín, Madrid.
Proyecto y supervisión de obra



Puerto Cortés, Honduras.
Proyecto y supervisión de la ampliación
de la terminal de graneles sólidos



Metro de Málaga.
Supervisión de los proyectos y
de las obras de las líneas 1 y 2

detrás de grandes obras siempre hay una gran ingeniería

- Conocimiento, experiencia, capacidad técnica e independencia empresarial.
- 2.500 profesionales de la consultoría al servicio de la inversión en infraestructuras y equipamientos, tanto en España como en el mercado internacional.
- Desarrollo propio de tecnologías aplicadas y nuevos sistemas avanzados. Más de 30 proyectos de I+D+i en marcha.
- Exportación de ingeniería española a todos los continentes, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

TYPSA
INGENIEROS
CONSULTORES
Y ARQUITECTOS

www.typsa.com