

EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN EN LIMOS LOÉSSICOS COMPACTADOS A TRAVÉS DE ENSAYOS DE FILTRACIÓN¹

Marcelo E. Zeballos², Agustín Adami³, Roberto E. Terzariol⁴ y Ricardo J. Rocca⁵

Resumen: El limo arenoso de las formaciones loésicas se caracteriza por su alta sensibilidad a los cambios de humedad. Esta condición lo cataloga como internamente inestable. A pesar de calificación, se constituye, en un material aplicable a diversas construcciones (viales e hidráulicas). Algunas referencias bibliográficas cuestionan la aplicación de estos materiales en obras de infraestructura debido a su potencialidad de erosión. En otros casos, se indica que, para un adecuado funcionamiento el sistema debe contar con filtros de protección. En particular, los limos arenosos estudiados pueden considerarse incluidos en el grupo de aquellos materiales pasibles de sufrir procesos de sufusión, o inestabilidad interna de la estructura del suelo. En consecuencia, es de interés entender bajo qué condiciones se produce la erosión y que magnitud puede alcanzar. Si se aplica un filtro, el mismo debe actuar controlando la pérdida de material y asegurando la estabilidad del flujo. Este estudio muestra los resultados experimentales del análisis del fenómeno de erosión en limos loésicos con bajo nivel de compactación. Se han efectuado ensayos de filtración para la evaluación de la erosión y para el estudio de comportamiento de los sistemas suelo-filtro. La metodología de ensayo aplicada procura el seguimiento de los lineamientos de estudio que actualmente se discuten a nivel mundial. Los estudios se han concentrado en el análisis de la influencia de variables tales como: grado de compactación, gradiente hidráulico y composición del material de filtro. Los resultados obtenidos permiten establecer lineamientos de recomendaciones de aplicación en referencia al comportamiento esperado y la constitución de los sistemas de filtro, a fin de controlar adecuadamente la sufusión.

Palabras clave: erodabilidad, filtración, loess, sufusión.

EVALUATION OF EROSION ON COMPACTED LOESSIC SILTS THROUGH FILTRATION TESTS

Abstract: The high sensitivity to changes in moisture is a characteristic of sandy silt soil of loessic formations. This feature makes it denominated "internally unstable". However, often it is used in numerous infrastructure projects (road and hydraulic) material. Some citations do not recommend the use of these soils in infrastructure, because of the possibility of erosion. In other cases, it is recommended for proper operation of the construction, must have protective filters. In particular, the studied sandy silts can be considered included in the group of soils with the possibility of suffering suffusion processes, or internal instability of soil structure. Consequently, it is interesting to understand the conditions under which erosion occurs and predict the potential extent. This paper presents the experimental study of the phenomenon of suffusion of silt loess source with low compaction. For the assessment of erosion and the study of the behavior of the soil-filter system has been performed filtration tests.

¹ Artículo recibido el 6 de enero de 2014 y aceptado el 10 de abril del 2014.

² Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
E-mail: marcelozeballos@yahoo.com.ar

³ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
E-mail: adamiagustin@gmail.com

⁴ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
E-mail: reterzariol@gmail.com

⁵ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
E-mail: rjrocca@yahoo.com

The applied test methodology tries tracking study guidelines currently being discussed worldwide. Studies have evaluated the influence of variables such as degree of compaction, hydraulic gradient and composition of the filter material. The results obtained allow application recommendations for design studies and the establishment of filter systems for the control of suffusion.

Keywords: erodability, loess, filters, suffusion.

INTRODUCCIÓN

En gran parte del Territorio Argentino predominan suelos de tipo limo-arenosos provenientes de Formaciones Loésicas. Su estudio local se encuentra bastante difundido. Caracterizaciones detalladas de estos suelos pueden encontrarse en Rocca et al (2006) y Rinaldi et al (2007). Se trata una tipología de suelo limo arenoso, limo arcilloso, abundante en varias regiones del mundo, en la zona central de los Estados Unidos de Norteamérica, el Este de Europa, China, etc. Algunas publicaciones de referencia en este sentido son, Delage et al (2005); Wang y Bay (2006); Lutenegegger (2012), entre otras.

En su estado natural el suelo es catalogado como estructuralmente inestable, en función de su alta sensibilidad a los cambios de humedad. A pesar de esto, y en función de su abundancia, este material es frecuentemente empleado en obras civiles. El uso más extendido es como suelo compactado, en la composición de terraplenes uniformes en obras viales, o como componente del cuerpo de presa de obras hidráulicas de llanura. En todos los casos, el suelo compactado interactúa con el agua, ya sea por filtración de esta a través del medio poroso, o por escurrimiento sobre la superficie del material. Esta interacción, suelo – fluido ha mostrado, en diversos casos, el desarrollo de fenómenos de erosión, los cuales derivan en deterioros parciales o, inclusive, en la falla de la estructura.

A consecuencia de la falla ocurrida en algunas estructuras, Smalley and Dijkstra (1991) postularon que los loess no deberían ser usados en núcleos de presas, ya que no tienen la mineralogía y propiedades requeridas para esa aplicación. Aún compactándolos, permanecen dilatantes y presentan una alta potencialidad de erosión. En réplica a esta afirmación, Perry (1991) indica que el carácter altamente erosivo de los loess es bien conocido. La prevención de la tubificación de un núcleo fracturado de loess requiere de un filtro aguas abajo.

En Argentina, el ejemplo más conocido de utilización de limos, de origen loésico, en la constitución de presas materiales sueltos, y con la presencia de este material en el cimiento, es Río Hondo, construida a principios de 1960 (Grandi et al., 1961 y Moretto et al., 1963). En general, la obra ha presentado hasta la actualidad un comportamiento satisfactorio. Análisis de los efectos de la erosión interna en la presa de Río Hondo han sido realizados por Buraschi y Pujol (1999).

El proceso de erosión por filtración, puede activarse de varias formas. Una de las más conocidas es el fenómeno de dispersión, que se vincula con la modificación de la migración, ante el flujo de agua, de iones de sodio en la estructura arcillosa del suelo. Este hecho deriva en la reducción de la cementación interna y el colapso del suelo. Otro fenómeno de aplicación comprende la sufusión o erodabilidad interna. Esta se vincula con estructuras internas del suelo que, por su composición granulométrica y organización estructural puede ser intrínsecamente inestables.

En Argentina, en particular en el Área de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba, se han desarrollado proyectos basados en el estudio del comportamiento hidráulico de los limos de origen loésico (Rocca et al., 2010). En la caracterización del comportamiento del suelo frente a los procesos de erosión, interesan dos aspectos: a) evaluar la potencialidad de erosión que presenta el material, y b) identificar los requerimientos de acciones de control que resultan de aplicación a nivel de las obras de infraestructura. En consecuencia, los análisis realizados contemplan estos elementos de la siguiente forma. En primer término, se evalúan las condiciones hidráulicas que pueden iniciar procesos de erosión en suelos limo-arenosos compactados. Por otra parte, se valoran las condiciones en las que debe ser “protegido” el suelo limo arenoso, para evitar los fenómenos de erosión por filtración. Bajo el concepto de protección del suelo, se pueden formular diversas medidas de acción, tales como; la modificación estructural del suelo, incluyendo en él componentes que incrementen su resistencia interna a la erosión, la disposición de barreras de control constituidas por geosintéticos con diversas funciones, o como en este caso, la constitución de filtros con materiales de granulometría mayor a la existente en el material de base a proteger.

Se analizan los comportamientos que se relacionan con la estabilidad hidráulica de suelos del tipo limo arenoso

compactado, sometiendo el material a situaciones de erosión con diferentes gradientes hidráulicos. A nivel de la estabilidad frente a la erosión se valoran estos conceptos a través de la identificación de las tensiones de corte generadas por el fluido sobre la estructura del sólido y se reconocen las condiciones de estabilización de los procesos de filtración. Se ha evaluado la aplicabilidad de formulaciones de calificación internacionalmente propuestas para la constitución de filtros.

Considerando que, uno de los aspectos de mayor discusión a nivel internacional en este punto es la secuencia metodológica de ensayo, se muestran los resultados obtenidos en el programa de ensayos efectuados para ambos tipos de determinaciones, analizando las limitaciones de los sistemas empleados y su posibilidad de empleo como sistemas sencillos de reconocimiento y de fácil aplicación en el diseño de obras de infraestructura.

EROSIÓN EN SUELOS LOESSICOS. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Los procesos de erosión interna requieren, para su ocurrencia, la existencia de varios elementos condicionantes. En particular, el proceso de sufusión se interpreta como el arrastre de partículas finas, componentes de la granulometría inicial del suelo, en el marco de una estructura de partículas de mayor tamaño. Bajo estos conceptos, la autoestabilidad del suelo se vincula con los mismos criterios empleados para el diseño de los filtros. Este planteo resulta de fundamental importancia para la comprensión de la línea de investigación seguida por los diversos autores.

La intención de identificar la potencialidad de ocurrencia de fenómenos de inestabilidad interna y su control, no es reciente. Varios autores en los últimos 50 años, han procurado definir parámetros o variables que posibiliten esta caracterización. Los estudios realizados por Khor y Woo (1989), Foster y Fell (2000), Delgado y Locke (2000), son ejemplos al respecto.

La existencia de sufusión se interpreta a través del vínculo entre la granulometría del suelo (especialmente en los tipos friccionales) y de otros parámetros que caractericen el proceso de filtración, tales como; la velocidad de filtración (v), la tensión de corte generada por el desplazamiento del fluido en el interior del medio poroso (τ) y el gradiente hidráulico (i). La influencia conocida de algunos de estos factores es tratada a continuación.

Influencia de las relaciones granulométricas

La composición granulométrica del suelo, y en particular la discontinuidad en la variación gradual del los tamaños, ha sido uno de los elementos más empleados en la identificación de la potencial sufusión. Istomina (1957) y Lubochkov (1965) explican el potencial de inestabilidad interna a través del Coeficiente de Uniformidad (CU). Kezdi (1969) propone un método para la determinación de la estabilidad interna del suelo utilizando la granulometría del suelo y dividiéndola en un punto arbitrario para la conformación de dos partes: las fracciones de partículas gruesas y finas, criterio que fue posteriormente empleado por De Mello (1975), Kovacs (1981) y Kenney y Lau (1986) como base de sus análisis.

Otra forma de caracterización de los materiales es a través de sus denominados tamaños característicos de partículas, en relación con su pasante en la curva granulométrica. En la interacción entre el suelo que se pretende proteger (base) y el empleado como medio de control (filtro), estos tamaños de partículas se identifican como D_b y D_f . Las variables más empleadas en la fijación de relaciones de tamaño, son el diámetro del pasante 85% del suelo base (D_{b85}), y el correspondiente al 15% de pasante del filtro (D_{f15}).

Sherard y Dunnigan (1989), en función de estudios realizados en la Universidad de New Sales West, establecen relaciones granulométricas para la potencialidad de ocurrencia de la sufusión, en estas relaciones establecen por primera vez, la posibilidad de vincular la granulometría del componente que actúa como filtro (variable dependiente), con alguna otra variable que interviene en el fenómeno (y que actúa como variable independiente). La Figura 1 muestra las tendencias definidas Burenkova (1993). Se aprecia la intención de poder identificar, en el sistema coordinado planteado, sectores en los cuales pueden calificarse los potenciales comportamientos erosivos. Se establece campos granulométricos, para los cuales el suelo muestra una mayor potencialidad de desarrollo de fenómenos de sufusión.

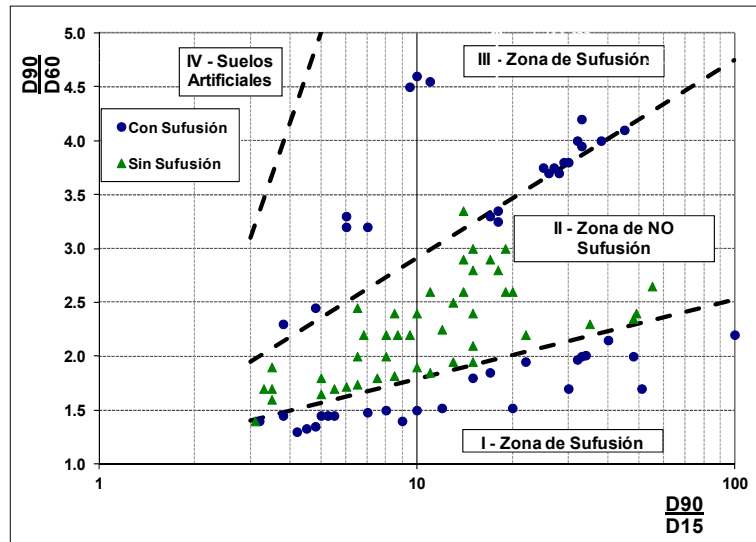


Figura 1: Caracterización de la potencialidad de sufusión de los suelos.
(Fuente: Elaborado a partir de Burenkova, 1993).

Analizando las investigaciones de distintos autores, Foster y Fell (1999) llevaron a cabo ensayos para identificar los requerimientos granulométricos que logran comportamientos no erosivos. Para estos estudios, utilizaron equipos similares a los empleados por Sherard y Dunnigan (1989). La Tabla 1 muestra los criterios propuestos por estos autores

Tabla 1: Resumen de resultados del análisis estadísticos de ensayos de filtro de no erosión, y proposición de criterios. (Fuente: Foster y Fell, 1999).

Suelo Base	1	2A	3	4A.
Contenido finos	≥85%	35-85%	<15%	15-35%
Criterio Sherard y Dunnigan (89)	$D_{15f} \leq 9D_{85B}$	$D_{15f} \leq 0,7 \text{ mm}$	$D_{15f} \leq 4 D_{85B}$	$D_{15f} = \frac{40 - \% \#200}{40 - 15} \cdot (4D_{85B} - 0,70) + 0,70$
Rango de D_{15f} para que no erosione	6,4 a $13.5D_{85B}$	0,7 a 1.7 mm	6,8 a $10.0D_{85B}$	1,6 D_{15f} a 2.5 D_{15f} del criterio de diseño de Sherard y Dunnigan
Criterio para que no erosione	$D_{15f} \leq 9D_{85B}$	$D_{15f} \leq 0,7 \text{ mm}$	$D_{15f} \leq 7 D_{85B}$	$D_{15f} \leq 1.6D_{15fd}$ $D_{15fd} = \frac{35 - \% \#200}{35 - 15} \cdot (4D_{85B} - 0,70) + 0,70$

Un revisión similar es formulada por Park et al (2003), incluyendo los criterios empleados desde 1994 por el USBR.

Estos criterios han sido complementados con los conceptos de sufusión, o inestabilidad interna del suelo base. Sobre la base del uso de equipos de filtros de erosión continua (Continuous Erosion Filter, CEF), Foster y Fell (2001) complementaron los conceptos, propuestos por Sherard y Dunnigan de falta de erosión, erosión mínima, erosión excesiva y erosión continua. Según estos estudios, se establece una relación entre el contenido de arenas de tamaño inferior a medias y el D_{15} del suelo que controla la erosión. Estos autores proponen ábacos de caracterización de potencial erosión esperada, según la relación entre el D_{F15} del filtro, y el contenido de arenas finas del suelo base. Las principales conclusiones a las que se arriba son:

- Los filtros con un buen comportamiento, tiene un $D_{F15} \leq 0,5 \text{ mm}$, y cuando se trata de suelos que corresponden al grupo 2 en el suelo de base (según la clasificación de Sherard y Dunnigan, 1989), presentan un $D_{F15} = 0,7 \text{ mm}$. Los componentes gruesos, son ligeramente más gruesos que estos valores (con D_{F15} superiores a 1,5 mm).
- Los filtros con mal comportamiento presentan un $D_{F15} > 1,0 \text{ mm}$ y, generalmente, presentan D_{F15} , en

concordancia con pérdidas mayores o iguales a $0,25 \text{ gr/cm}^2$. En la granulometría del filtro, las partículas mayores se ubican muy cerca del límite grueso del entorno.

La revisión efectuada les permite concluir en los indicadores contenidos en la Tabla 2, los cuales resumen los criterios para la identificación de las tendencias a erosión excesiva y continua.

Tabla 2: Criterios para la identificación de condiciones de erosión excesiva o continua. (Fuente: Foster y Fell 2001).

Suelo Base	Criterio propuesto para ...	
	Erosión excesiva	Erosión continua
$D_{95b} < 0,3 \text{ mm}$	$D_{15f} > 9 D_{95b}$	Para todos los suelos $D_{15f} > 9 D_{95b}$
$0,3 \text{ mm} < D_{95b} < 2 \text{ mm}$		
$D_{95b} > 2 \text{ mm}$ y $\#200 < 15\%$		
$D_{95b} > 2 \text{ mm}$ y $15\% < \#200 < 35\%$	$D_{15f} > 2,5 D_{15fd}$ $D_{15fd} = \frac{35 - \% \#200}{35 - 15} \cdot (4D_{85B} - 0,70) + 0,70$	
$D_{95b} > 2 \text{ mm}$ y $\#200 > 35\%$	Promedio de $D_{15f} > D_{15f}$ para el cual se obtiene una erosión de $0,25 \text{ gr/cm}^2$ en el ensayo CEF o Límite grueso con $D_{15f} > D_{15f}$ para el cual la erosión es inferior a $1,0 \text{ gr/cm}^2$ en el ensayo CEF	

Siguiendo la línea de pensamiento de estos autores, puede considerarse que la migración de partículas en la masa de suelo es atribuible a la presencia de material internamente inestable o a la conformación de granulometrías del tipo discontinuas, con una marcada carencia de los tamaños medios. Fell et al. (2005), procuran resumir los factores que concurren para el desarrollo del fenómeno, señalándolos como:

- La existencia de una corriente de flujo dominante a partir de una fuente de provisión de agua.
- El material afectado por la corriente de agua, debe ser erodible, y debe ser arrastrado por la corriente de agua.
- Debe existir una vía de salida del material erosionado, no suficientemente bien controlada.
- Cuando se forma una tubificación, el material contribuye al desarrollo del tubo, formando una cavidad de circulación.

Wan y Fell (2008), identificando a estos suelos como internamente inestables, señalan que la sufusión ocurre cuando suelos satisfacen los siguientes criterios:

- Los suelos poseen una estructura que permite la identificación de un sistema primario de particular (es decir, fracción más gruesa), el cual es el responsable de la transferencia de los esfuerzos.
- Las partículas sueltas (es decir, la fracción más fina), tiende a ocupar los vacíos formados por el sistema principal.
- Las partículas más finas del suelo presentan dimensiones menores que el tamaño de los vacíos de la estructura primaria.
- El flujo es capaz de llevar a estas partículas menores a lo largo del sistema de vacíos.

Influencia de la porosidad

Resulta evidente que la composición granulométrica de los suelos afectados no puede ser, por si misma, totalmente explicativa del fenómeno de erosión. Varias autores procuran concentrar sus conclusiones en la forma de acomodamiento de las partículas y el tipo de porosidad generada en la estructura de suelos.

Chapuis et al. (1996) estudiaron el efecto de compactación en el movimiento de las partículas que forman la fracción fina de los materiales empleados en bases granulares en carretera. Para esto realizaron pruebas de filtración con flujo descendente. Bakker et al. (1993), asume la similitud de las filtraciones de agua a través de un filtro granular con poros importantes, respecto del flujo en un canal abierto con el mismo material de base, y concluye en la proposición de una ecuación que relaciona la velocidad de filtración con el diámetro medio (D_{50}) y el gradiente hidráulico.

Para valorar en forma teórica la capacidad de migración de partículas finas a través de medios porosos de mayor tamaño, Indraratna (2007), revisa los criterios de tamaño base de constricción de la estructura, definiendo el diámetro de constricción (D_{cL}). Esta dimensión, está vinculada con el ordenamiento de las partículas que componen un material de filtro y, por consiguiente, relaciona la distribución de vacíos con la compacidad. El diámetro de constricción es el tamaño de partícula esférica que puede inscribirse entre tres partículas de mayor tamaño y en contacto entre ellas. La Figura 2 esquematiza el concepto de la constricción, en tanto que la ecuación (1) muestra la forma de establecimiento de la superficie de paso (S_c) entre partículas en contacto entre sí.

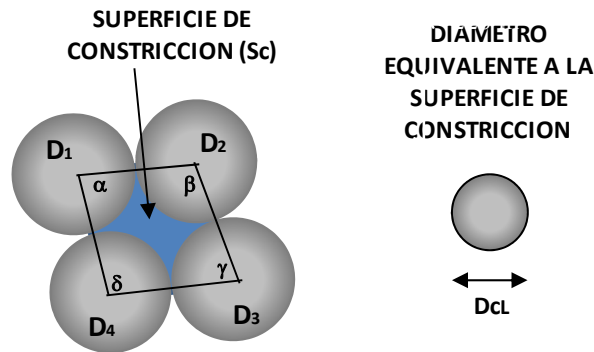


Figura 2: Esquemas de definición de la dimensión de constricción.
Fuente: Elaborado a partir de Indraratna (2007).

$$S_c = \frac{1}{8} \left[(D_1 + D_2)(D_1 + D_4) \cdot \sin(\alpha) + (D_2 + D_3)(D_2 + D_4) \cdot \sin(\gamma) - (\alpha \cdot D_1^2 + \beta \cdot D_2^2 + \gamma \cdot D_3^2 + \delta \cdot D_4^2) \right] \quad (1)$$

Donde, los ángulos β , γ y δ , están relacionados con el ángulo α , varía en un entorno comprendido entre $\alpha_{\min}$ y $\alpha_{\max}$. El mayor de los valores de S definido dentro del entorno antes indicado, permite establecer el diámetro de constricción en la forma indicada en (2).

$$D_{cL} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{c\max}}{\pi}} \quad (2)$$

El concepto inicialmente planteado para la valoración de la relación entre suelo de base y filtro es extendido al análisis del comportamiento de un único suelo, bajo un criterio de respuesta bimodal (Indraratna et al., 2011). Tomando como fuente diversas referencias bibliográficas, establecen la relación entre el tamaño de pasante del 85% de la fracción fina (d_{85f}) y el diámetro de constricción característico (D_{c35}^c). El autor concluye en la identificación de relaciones límites para la diferenciación entre comportamientos estables y no estables. Las relaciones obtenidas son las indicadas como (3).

$$D_{c35}^c > 0,82 d_{85f} \quad \text{inestable.} \quad \text{y} \quad D_{c35}^c < 0,73 d_{85f} \quad \text{estable} \quad (3)$$

Li y Fanni (2013) profundizan en el análisis anterior, siguiendo los lineamientos de Kovac (1981). Los autores analizan el comportamiento del suelo diferenciando dos fracciones divididas por un diámetro arbitrario D : la fracción fina (F) menor al diámetro D y la fracción granular con diámetro mayor a D . Para la división de materiales

establecidas, se identifica el tamaño correspondiente al 85% de la fracción fina (d'_{85}) y el tamaño característico de los poros que forman la fracción gruesa (d_o). El tamaño característico de la fracción gruesa se establece a partir de la valoración del tamaño efectivo de las partículas componentes y la porosidad de esta fracción.

A partir de estas definiciones, los autores consideran diversos casos de la bibliografía, verificando las situaciones en las cuales se han alcanzado condiciones de inestabilidad. De esta forma, se concluyen en las condiciones de estabilidad indicadas en (4).

$$d_o > 2,3 d'_{85} \quad \text{inestable} \quad \text{y} \quad d_o < 1,0 d'_{85} \quad \text{estable} \quad (4)$$

Indraratna et al. (2011), concluye en la posibilidad de empleo de relaciones que tomen en consideración el tamaño de partículas representativas de la fracción menor, en comparación con el tamaño de los vacíos de la estructura primaria, que actúan como elementos de restricción al movimiento. Este modelo teórico parece proporcionar una evaluación razonable de la posibilidad de sufusión en suelos granulares.

Influencia de la tensión de corte del flujo

Los estudios realizados por Briaud et al. (1999a, 1999b, 2001), sobre los procesos de erosión en suelos cohesivos resultan altamente ilustrativo de la incidencia de este factor. Los resultados de dichas experiencias permitieron encontrar una relación directa entre la tensión de corte crítica (τ_c) y las dimensiones de referencia del suelo (D_{50} , en mm) de aplicación confiable para el grupo de los suelos granulares (arenas). Los criterios de estabilidad de materiales finos (limos y arcillas) responden a procesos de mayor complejidad, evalúan la resistencia propia del suelo ante la tensión de corte generada por el flujo (τ_c), y por consiguiente deben ser valorados con otras variables en forma complementaria.

Para evaluar la relación entre la velocidad de erosión y la tensión de corte generada por el fluido en la interfase suelo-agua, se desarrollaron numerosas metodologías de laboratorio, tales como: a) Erosión de chorro, (Chevalier et al., 2010), b) Erosión superficial medida (Briaud et al. 2001), c) Erosión en canal de descarga y ensayos con bomba de flujo (Reddi et al. 2000), d) Dispositivos de cilindro, similar a la celda triaxial (Bendahmane et al., 2008); y e) Ensayos de erosión en agujero (Hole Erosion Test, HET) desarrollados para estudiar las características de la erosión del suelo en las grietas de las presas de terraplén (Wan y Fell, 2008) e inspirado en el ensayo pin-hole (ASTM 2006).

En esta investigación, se han empleados variaciones de equipo de ensayo de esta última modalidad.

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL ANALIZADO

Los estudios realizados han empleado como material de base suelos loésicos de la Ciudad de Córdoba. Las características de este suelo han sido descriptas por diferentes autores, incluyendo a Reginatto (1970), y Moll y Rocca (1991). El limo arenoso constituye la fracción predominante de los suelos loésicos de la Región Central de Argentina. En general, la distribución granulométrica comprende arena (2% a 10%), limo (40% a 80%), y arcilla (20% a 35%). Se completa con carbonato de calcio, variable entre 2% y 10%, que se presenta en forma de nódulos, comúnmente denominado tosca, o precipitado en el contacto entre partículas, y se distinguen por ser suelos naturalmente alcalinos, con valores de $pH > 8$. Si bien existen indicadores que confirman que las Sierras de Córdoba han tenido algún efecto sobre la composición mineralógica de los depósitos de loess, éstos se encuentran formados, principalmente, por minerales de origen volcánicos, en especial, pertenecientes a rocas basálticas y andesita, generados a nivel de la Cordillera de los Andes, y transportados por el viento.

El suelo empleado para la ejecución de los ensayos de laboratorio corresponde a material obtenido del predio de Ciudad Universitaria perteneciente a la Universidad Nacional de Córdoba, y se localiza en el sector sur de la Ciudad de Córdoba. Los resultados de ensayos de identificación del suelo indican que el mismo corresponde un suelo limoso de baja plasticidad. El suelo pertenece a la formación loésica del centro de Argentina y se designa como ML dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). En la Tabla 3 se presentan las propiedades físicas de caracterización determinadas sobre el suelo utilizado.

Tabla 3: Propiedades del material de base empleado.

Propiedad	Valor
Humedad natural (ω), (%)	12,7 - 20,7
Peso unitario seco (γ_d), (kN/m ³)	12,3
Gravedad específica (Gs)	2,65
Límite líquido (ω_l), (%)	24,4
Límite Plástico (ω_p), (%)	21,0
Índice plástico (IP), (%)	3,4
Partículas < 4,50 mm, (%)	100,0
Finos < 0,075 mm, (%)	93,4
Arcilla < 0,002 mm, (%)	14,0
Clasificación USCS	ML

Se realizaron ensayos de compactación, mediante los cuales se obtuvo la relación entre humedad de compactación y peso unitario seco del suelo para una energía de compactación correspondiente al 100% del ensayo Proctor Estándar. Para esta determinación la humedad óptima (ω_{opt}) resultó igual a 15.5% y peso unitario seco máximo ($\gamma_{d,max}$) igual a 17.6 kN/m³. Para obtener las curvas de compactación con energías reducidas se aplicó el 90% de la correspondiente al ensayo antes indicada, designándola como Proctor Reducido. Esta última forma de ensayo ha sido aplicada para simular el comportamiento de suelos en condiciones deficientes de compactación.

Con la intención de evaluar la respuesta del material de base en relación con potenciales filtros de control, de aplicación frecuente en obras de ingeniería, se ha empleado una arena fina, pobremente graduada, calificada como SP. En los usos frecuentes de este material de filtro (arenas), el mismo se lo combina con distintas proporciones del material de base (limo). Se han conformado mezclas con distintas proporciones de estos suelos, la Figura 3 muestra las combinaciones granulométricas conformadas. En la misma Figura se ha indicado el entorno dentro del cual debería ubicarse el tamaño de partículas correspondientes al 15% de pasante del filtro ($D_{F15\%}$). Aplicando los criterios de Sherard y Dunnigan, a los materiales considerados se aprecia que:

- El material de filtro fijado con las características de arenas, sin limos, se centra en el rango recomendado por aquellos autores.
- Todas las mezclas consideradas presentan relaciones granulométricas que tienden a evitar la erosión excesiva del suelo de base.
- El contenido de limos superiores al 20% en la mezcla, generan materiales con baja permeabilidad, y por consiguiente una deficiente calidad de filtrado.
- Si se considera la recomendación complementaria de utilización en el caso de suelos de base finos, en relación con una limitación en el pasante del tamiz 200 a no más de 5%, las combinaciones propuestas superan esta recomendación, con excepción de aquella que utiliza un 95% de arenas.

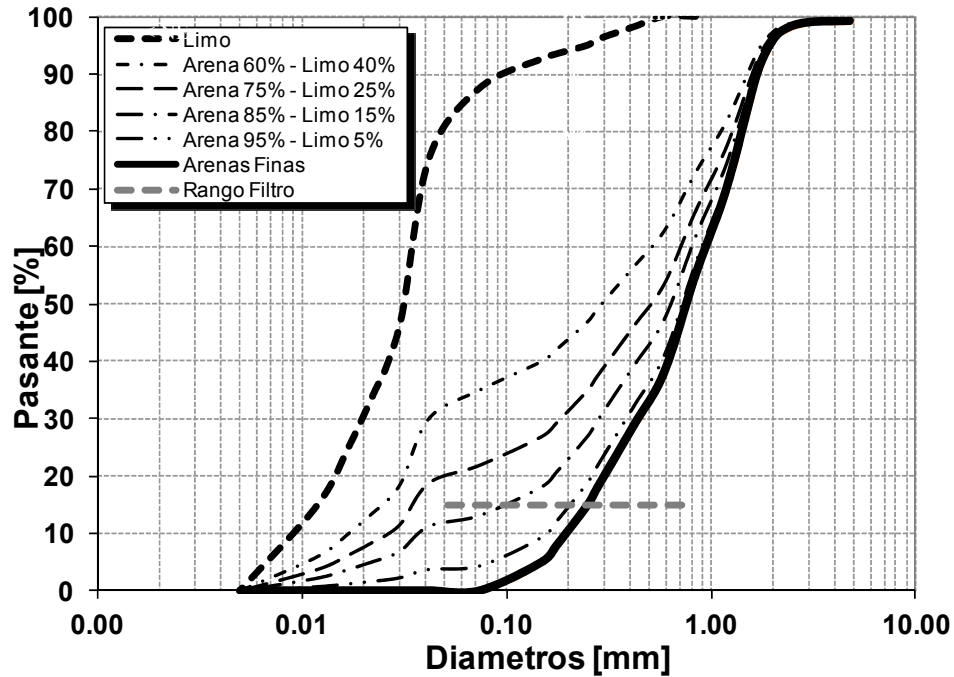


Figura 3: Granulometría del suelo base (limo) y de las alternativas de filtro (arena+limo) empleados.

A fin de valorar el potencial comportamiento del suelo base frente a los procesos de erosión, se han contemplado varios de los criterios de clasificación antes indicados. La Figura 4 se presenta la localización del suelo analizado en relación con los estudios efectuados por Burenkova (1993).

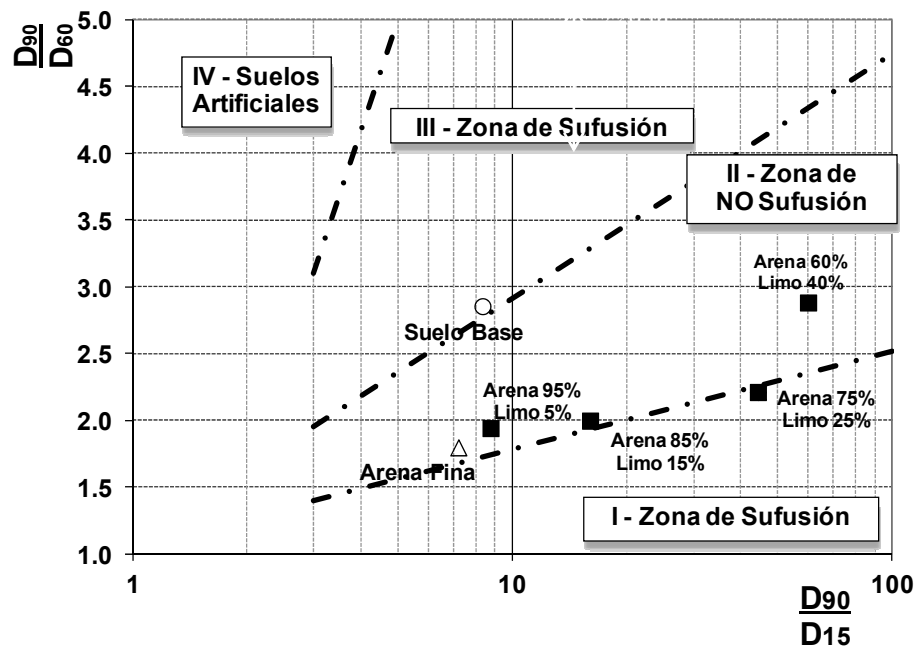


Figura 4: Ubicación del limo y las mezclas de filtro estudiadas, en relación con el gráfico de Burenkova para la caracterización del potencial de sufusión.

Según este criterio de caracterización pueden realizarse las siguientes observaciones:

- El suelo base, se encuentra dentro en la zona considerada de frontera entre la condición estable e inestables (de sufusión). Al respecto, cabe considerar que, en función de los tamaños de partículas que se consideran para estos suelos, ligeras variaciones en la apreciación de los diámetros característicos, atribuibles a los propios ensayos de caracterización granulométrica por sedimentación, pueden derivar en significativas modificaciones en la localización del punto representativo dentro del ábaco de clasificación.
- La arena fina empleada como base para la conformación del filtro, si bien se encuentra dentro de la zona estable, se localiza en proximidad de la línea de división con los comportamientos inestables.
- A nivel de las mezclas, lo correspondiente a 85% y 75% de arena, se ubican en el límite del comportamiento estable, en tanto que aquellas que utilizan el 95% o el 60% de arenas, se localizan en forma definida dentro de la zona estable.

Teniendo en cuenta los criterios establecidos por Li y Fanni (2013), se ha dividido la composición granulométrica, tanto del material de base, como de las mezclas que se emplearon como filtros, en una fracción fina (F) y una fracción gruesa (G), delimitadas por un diámetro $D=0.42\text{mm}$ (Tamiz N°40). Mediante esta metodología se obtiene dos nuevas curvas granulométricas y se determina D_{85} de la fracción fina y diámetro aproximado de constricción (d_o) correspondiente a la fracción granular. En la Figura 5 se ilustra el diagrama propuesto por Li y Fanni con la relación límite de materiales estables, y la calificación resultante para los distintos materiales. Los resultados indican que, en todos los casos, para las condiciones de compactación aplicada, los materiales empleados se deben comportar en forma estable.

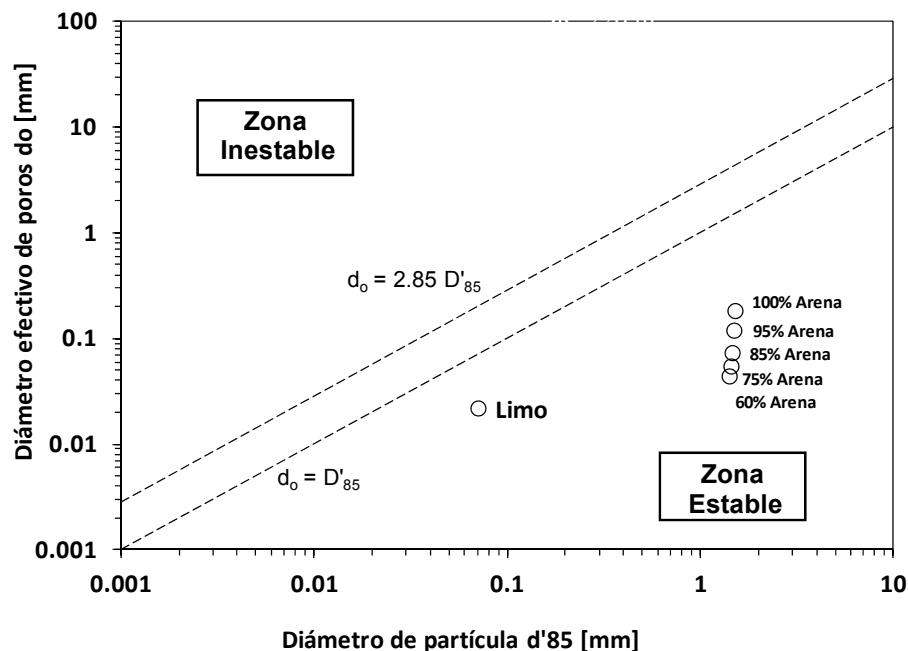


Figura 5: Ubicación del limo estudiado en relación con el gráfico de Li y Fanni para la caracterización del potencial de erosión.

ENSAYOS REALIZADOS

El desarrollo del programa experimental ha sido dividido en dos partes componentes, según se ha indicado con anterioridad. Las características de los equipos y modalidades de medición aplicadas se muestran a continuación:

Ensayo de erosión en suelo base con orificio

Este grupo de ensayos procura el análisis de la potencialidad de erosión del suelo de base.

El equipo de ensayo se compone de una celda de permeabilidad de acero con las dimensiones características de un molde tipo Proctor T-180. El ensayo responde a los lineamientos establecidos por el tipo Pinhole (norma ASTM D4647-93), y adaptaciones realizadas por Indraratna et al. (2008) y por Haghighi et al. (2013). En la Figura 6 se presenta un esquema del equipo utilizado.

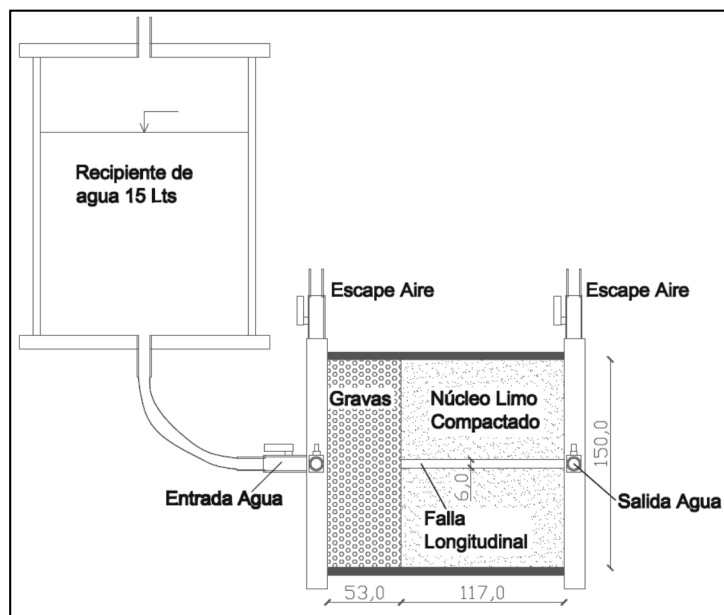


Figura 6: Esquema del sistema de ensayo.

La metodología de ensayo aplicada ha consistido en compactación dinámica del suelo de base en el permeámetro para, posteriormente, realizar una perforación en el centro de la probeta. De esta forma, se procura simular el comportamiento del suelo base con una falla interna, evaluando su respuesta frente al flujo interno. Aguas arriba de la probeta se dispone un material granular para generar una distribución uniforme de agua a la entrada del sistema. En el contacto entre ambos materiales se dispone una malla metálica de 1 mm de abertura a los fines de evitar la obturación del orificio con el material de distribución superior. Durante el ensayo se registra el proceso de filtración (midiendo el volumen de agua filtrado por unidad de tiempo) y el avance de la erosión interna (peso de material sólido receptado a la salida del sistema) para sucesivos gradientes hidráulicos.

Se compactaron probetas a diferentes densidades, comprendidas entre el 80% y el 97% del $\gamma_{d,max}$. Sobre estas se aplicaron gradientes hidráulicos comprendidos entre 0.5 y 8.0. Para cada probeta, se comienza el ensayo con un gradiente mínimo inicial, registrando el volumen de filtración y pérdida de suelo durante un periodo de 10 minutos.

El tiempo de registro antes indicado ha sido considerado suficiente como para lograr un flujo constante y la conclusión de la totalidad del proceso de erosión para el gradiente hidráulico aplicado. Concluida esta etapa se incrementa la presión de agua, y con esto el gradiente de aplicación y se repite el proceso de registro.

En el desarrollo del ensayo es posible valorar, dos elementos:

- La tensión de corte que genera el flujo sobre las paredes del orificio. La expresión de aplicación es la indicada en (5). Según Indraratna et al (2008, antes citado).

$$\tau = \frac{\rho_w \cdot g \cdot i \cdot \theta_t}{4} \quad (5)$$

Donde: ρ_w , es el peso unitario del fluido; g , es la aceleración de la gravedad; i , es el gradiente hidráulico y θ_t , es el diámetro medio del orificio de filtración.

- El gradiente de pérdida de material. Si bien se pueden realizar valoraciones de tipo teóricas sobre este parámetro, el mismo ha sido determinado a partir de la identificación de la cantidad de material erosionado durante el ensayo, y se ha considerado que el mismo produce una variación uniforme del diámetro del orificio.

Ensayo con celda de permeado para sistema suelo base-filtro con orificio

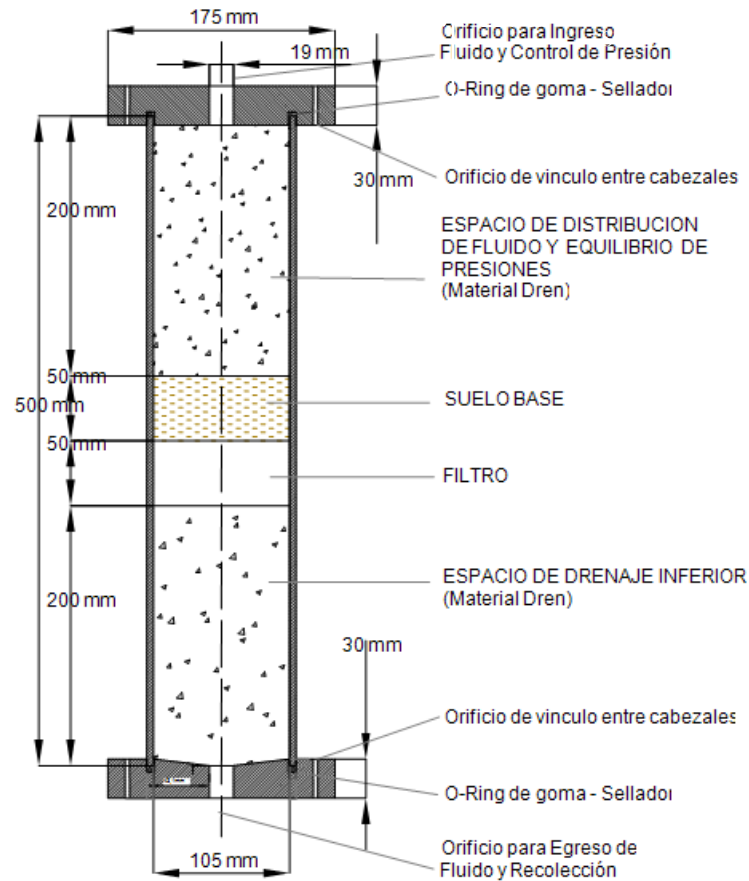


Figura 7: Esquema del sistema de ensayo.

Este grupo de ensayos procura el registro de la respuesta de distintos tipos de filtro a emplear para el control de las filtraciones en el limo loésico compactado.

Para este estudio se ha desarrollado una cámara de filtración de grandes dimensiones. Esta cámara cilíndrica tiene una longitud total de utilización de 500 mm, con un diámetro útil de 105 mm. La misma ha sido construida con material de acrílico transparente, lo cual permite el seguimiento visual del proceso de filtración. En su parte superior, la cámara se vincula con el sistema de inyección de agua a presión. La Figura 7 muestra en forma esquemática, la cámara de ensayo utilizada. El equipo así conformado, tiene dimensiones consistentes con los actuales lineamientos internacionales.

La probeta de ensayo permite la disposición de un material granular en la parte superior con el objeto de facilitar la distribución del agua que ingresa por la parte superior, posibilitando la infiltración en forma homogénea sobre la probeta. Abajo se ubica la propia probeta de suelo base. La altura de esta probeta se regula en función del gradiente hidráulico a aplicar. Bajo de la muestra de suelos base se localiza el material de filtro, y a continuación el dren del sistema. El equipo de ensayo tiene en su plato inferior un orificio de salida, que permite la recolección de los fluidos filtrados, así como la captación de las partículas sólidas que puedan migrar, desde el suelo base o desde el filtro.

En el proceso de montaje de la probeta, debe tener presente que, previo a la ejecución del ensayo, se realiza una perforación en la parte central de la probeta de suelo, a fin de simular la presencia de una fisura, la cual puede dar inicio, en el caso de erosiones descontroladas, a la inestabilidad total del material.

Los ensayos realizados han comprendido el análisis de la influencia de las siguientes variables independientes del fenómeno: a) composición granulométrica, planteada según se ha indicado en el apartado anterior; b) gradientes hidráulicos, se ha fijados valores igual a 20, 40 y 80, siendo estos valores similares a los empleados en ensayos convencionales de permeabilidad.

Cabe acotar que, en relación con los aspectos tecnológicos de elaboración de la probeta, las mayores dificultades han sido establecidas en la etapa de instalación del sistema de filtro y dren, a fin de lograr un adecuado contacto entre las distintas capas que componen la columna de filtración.

Los ensayos han sido realizados en todos los casos iniciando el proceso a partir de la condición de humedad de compactación. Se ha tomado lecturas tanto del volumen de agua filtrada, como de los sólidos que atraviesan el sistema de filtración. En todos los casos, las mediciones han sido desarrolladas a intervalos de tiempo durante un período no inferior a un día.

RESULTADOS OBTENIDOS

Ensayo de erosión en suelo base con orificio

Los ensayos efectuados han empleado un total de nueve probetas, compactadas con pesos unitarios secos comprendidos entre 14.5 kN/m^3 y 16.4 kN/m^3 . Los orificios iniciales en las probetas han comprendido dos valores: 4 mm y 6 mm. La secuencia de ensayos desarrolla con este equipo es la indicada en la Tabla 4. En la misma Tabla se presentan los resultados obtenidos a nivel de la tasa de pérdida de material para una tensión de referencia de 100 Pa.

En función de los gradientes hidráulicos aplicados, y las dimensiones medias de los orificios en cada etapa del desarrollo de los ensayos, se puede establecer la relación con la tensión de corte indicada en la Figura 8. Las Figuras 9 muestran imágenes de las probetas antes de ejecutar el ensayo y con posterioridad al mismo.

Las relaciones entre el peso unitario inicial de la muestra y la tasa de pérdida para la tensión de corte de referencia, se muestra en la Figura 10. En la visualización del conjunto de ensayos realizados, se aprecia que el proceso de erosión muestra un comportamiento variable, hasta alcanzar tensiones de corte del orden de los 60 Pa, registrándose una pérdida de sólidos menor a 0.4 gramos por minuto. Se aprecia que en los ensayos realizados con bajas tensiones de corte, la pérdida de material no muestra una marcada relación con el peso unitario seco del suelo. Para tensiones de corte superiores a 60 Pa, las probetas compactadas a mayor peso unitario muestran una erosión menor que aquellas menos densas. En consecuencia, la compacidad del material muestra su influencia en la resistencia al proceso erosivo. Este comportamiento se ve reflejado en la Figura 11.

Tabla 4: Resumen de ensayos efectuados.

Ensayo	P.Unit kN/m ³	Gradiente Hidráulico		Radio del Orificio (mm)		Tasa Perd kg/s/m ² x10 ⁻⁵
		inicial	final	inicial	final	
1	16.3	2.16	5.23	3.0	6.3	90
2	16.0	2.51	5.69	3.0	6.5	150
3	16.0	2.45	5.26	3.0	6.8	150
4	15.0	2.12	5.17	3.0	7.7	120
5	15.0	2.10	5.19	3.0	8.8	100
6	14.5	2.19	5.15	3.0	7.4	140
7	14.5	2.14	5.21	2.0	7.7	170
8	15.6	0.38	7.24	3.0	6.7	150
9	16.4	0.38	7.24	2.0	8.8	110

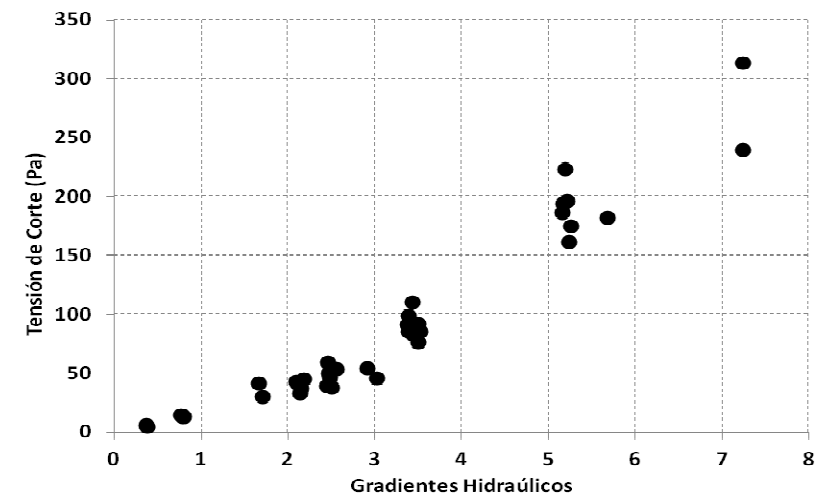


Figura 8: Relación entre gradientes hidráulicos aplicados y tensiones de corte en el orificio.

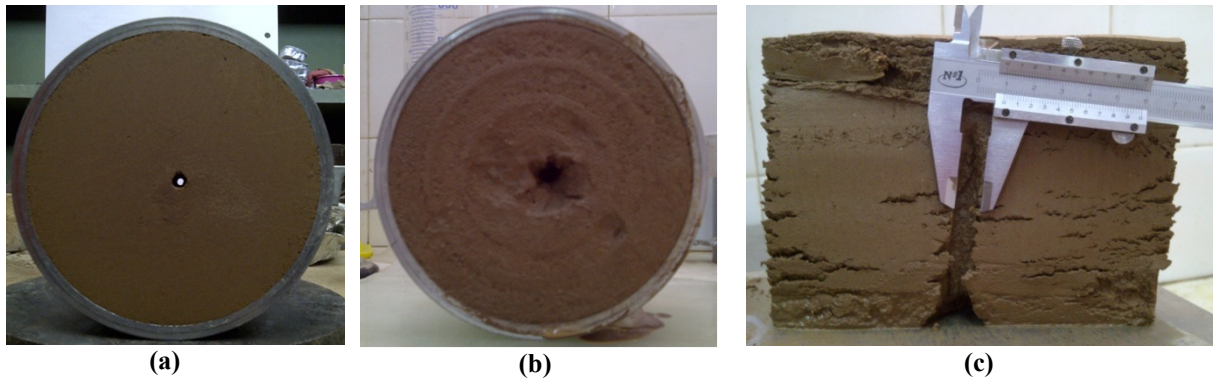


Figura 9: Fotografías tomadas sobre probeta ensayada. a) Estado de la probeta previo al ensayo, b y c) estado de la probeta luego del ensayo.

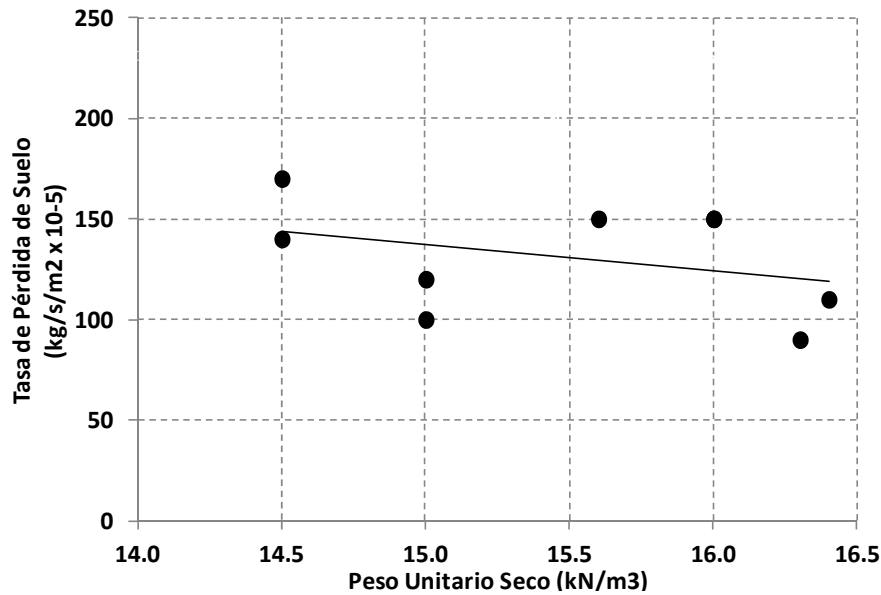


Figura 10: Relación entre peso unitario seco y tasa de pérdida de suelo.

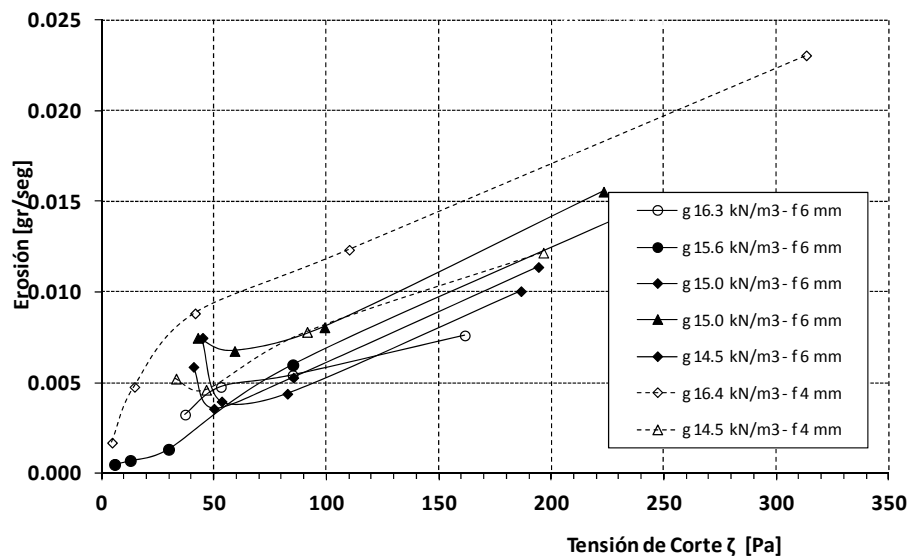


Figura 11: Relación entre la tensión de corte del fluido y la erosión instantánea.

En la Figura 12 se presenta el caudal de filtración registrado en función de la tensión de corte generada por el flujo. La relación encontrada es consistente con las variables involucradas, mostrando que, sobre el material compactado, aún para elevadas tensiones de corte, se logran condiciones de flujo estable. Las tendencias de proporcionalidad más evidentes se observan para valores superiores a los 60 Pa. La incidencia de la compacidad del suelo sobre esta variable no se puede apreciar en forma nítida. La tendencia aprecia resulta similar cuando se evalúa el radio teórico del orificio para cada gradiente hidráulico aplicado.

En la Figura 13 se observa que, las curvas registradas desarrollan una misma tendencia de crecimiento. Para algunos gradientes se puede reconocer el incremento de la compacidad de la muestra genera una tendencia a la reducción del radio de estabilización del orificio.

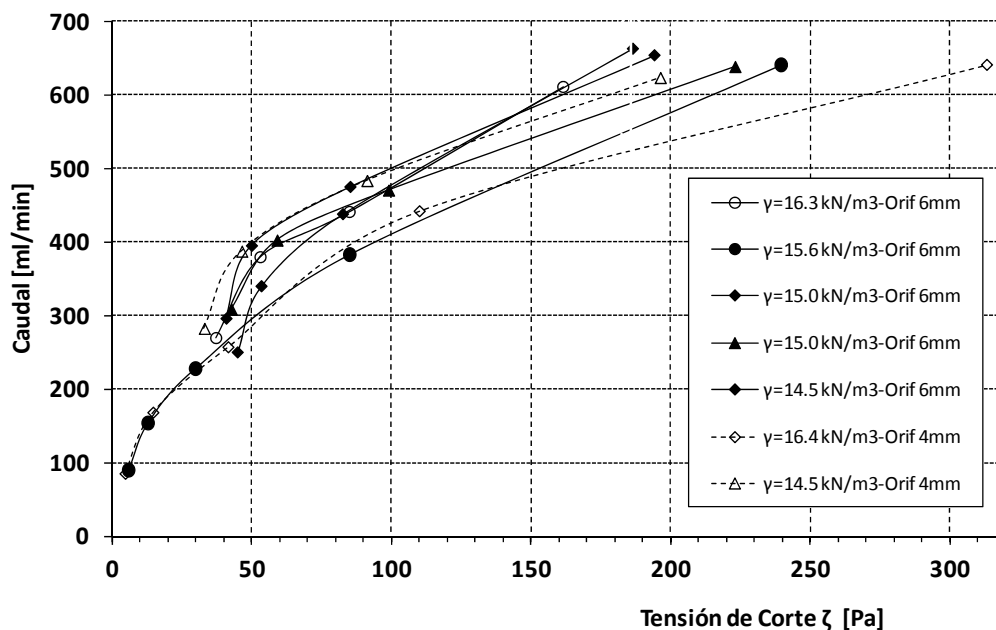


Figura 12: Relación entre la tensión de corte aplicada sobre el orificio medio del ensayo y el caudal filtrado.

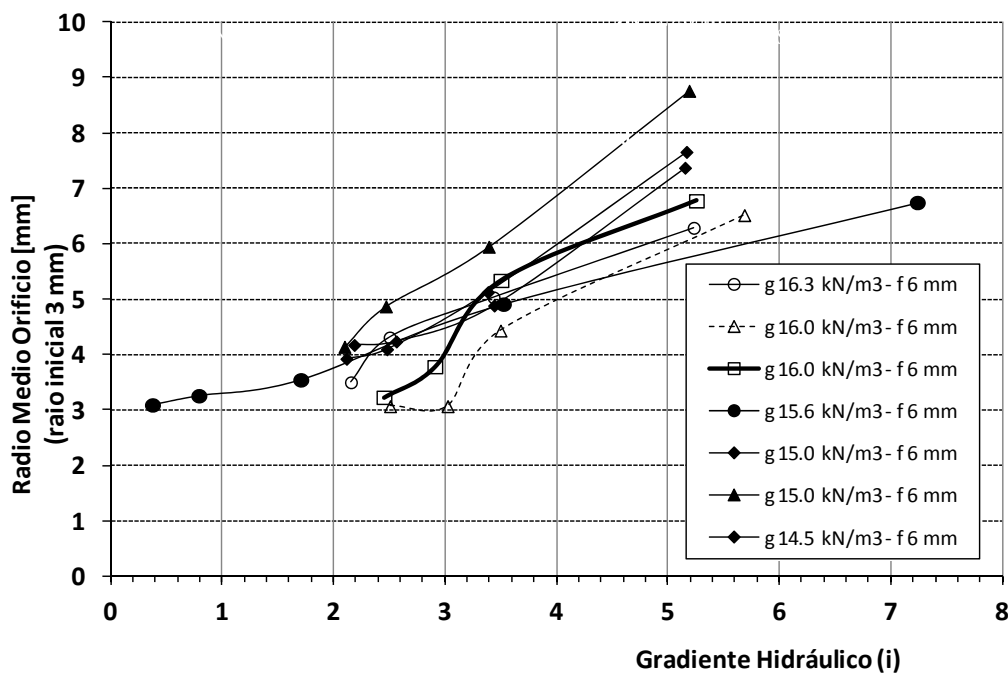


Figura 13: Relación entre el gradiente hidráulico aplicado y el radio medio del orificio en los ensayos de erosión.

Ensayo con celda de permeado sobre sistema suelo base-filtro con orificio

En relación con las variables dependientes del sistema de ensayos formulado, las mismas han sido las siguientes: a) relación entre el volumen de filtración y el tiempo de desarrollo del ensayo, b) cantidad de sólidos filtrados a través del sistema, c) velocidad de filtración en el sistema cuando el mismo alcanza la condición de funcionamiento en régimen, d) permeabilidad media del sistema bajo la operación en régimen. La disposición del sistema de ensayo se muestra en la Figura 14.

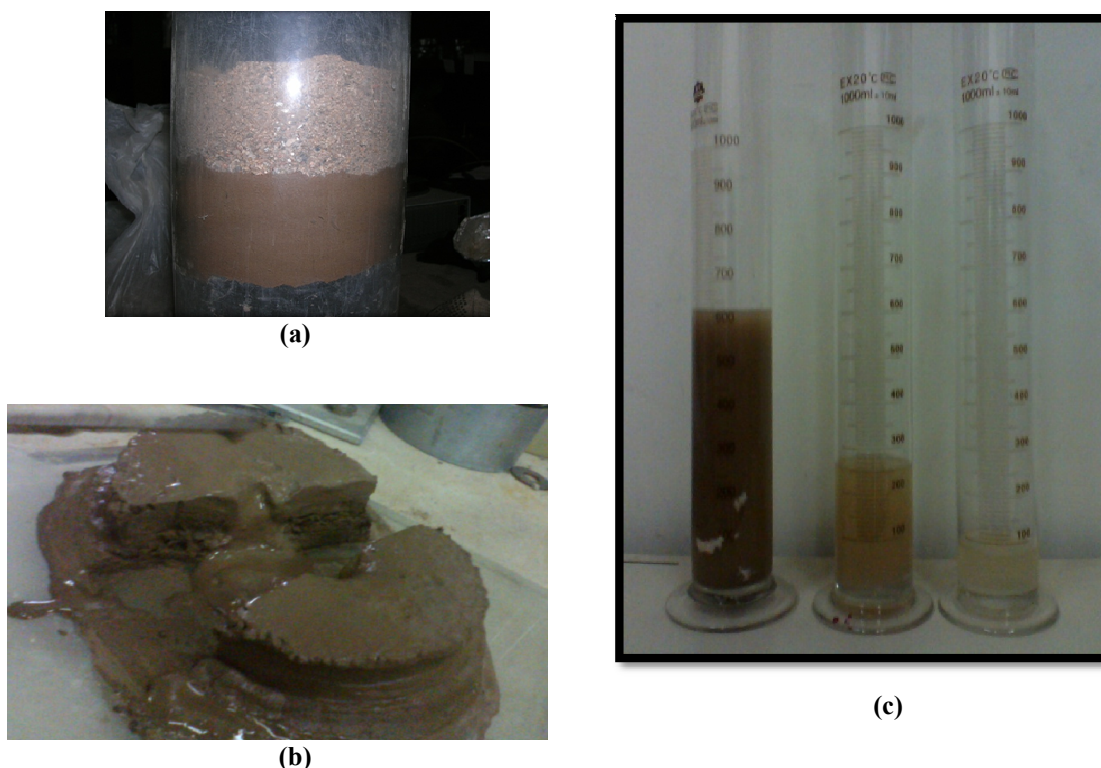


Figura 14: a) Probeta preparada, b) muestra de suelo base luego del ensayo, c) registro de aguas y sólidos filtrado en el ensayo.

En el conjunto de ensayos realizados cabe realizar las siguientes consideraciones previas a la presentación de los resultados. Las muestras correspondientes a las condiciones extremas dentro del grupo planteado han presentado comportamientos singulares. Aquellas con un 60% y un 100% de arena han mostrado un comportamiento altamente inestable, con importantes pérdidas ya sea del material de base o del propio material del filtro.

Los procesos de filtración desarrollados muestran que, luego de una etapa inicial y transitoria, con el desarrollo de un flujo de importancia, se ingresa en una instancia de flujo constante. La estabilidad del sistema se puede apreciar a través de la identificación de los valores medios de permeabilidad. Los mismos se aprecian constantes, aun para distintos valores de gradientes, verificando el cumplimiento de las leyes de Darcy..

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos, medidos en forma de velocidad de filtración lograda en la etapa de comportamiento estable, como también en la forma de coeficientes de permeabilidad general del sistema.

A modo de ejemplo se presentan las Figuras 15 de las evoluciones de los volúmenes de agua filtrados a través de la probeta desde el inicio del proceso de filtración. Los resultados obtenidos muestran una tendencia creciente de las filtraciones, tanto con el gradiente aplicado, como con el contenido de arenas incluido en las mezclas.

Tabla 5: Velocidad de filtración y permeabilidad en la etapa de funcionamiento estable de la filtración.

Gradiente	Velocidad de filtración en reg (cm ³ /s)			Permeabilidad en régimen (cm/s)		
	75%	85%	95%	75%	85%	95%
20	0.009	0.014	0.017	5.5×10^{-06}	8.2×10^{-06}	1.0×10^{-05}
40	0.019	0.022	0.027	5.6×10^{-06}	6.3×10^{-06}	7.9×10^{-06}
80	0.034	0.050	0.070	4.9×10^{-06}	7.2×10^{-06}	1.0×10^{-05}

Respecto de las pérdidas de sólidos medidas, la Figura 16 muestra los valores expresados como un porcentaje en relación con el peso seco total de la muestra de ensayo. Los resultados permiten observar que, los materiales sólidos perdidos durante el ensayo tienden a incrementarse en función del mayor contenido de arenas en la mezcla. Las evoluciones son moderadas para el caso de las combinaciones con hasta un 85% de arena. Para las mezclas con 95% de arena, el porcentaje de pérdida se incrementa significativamente, a casi el doble de los valores anteriores. Cabe acotar que gran parte de los materiales sólidos perdidos se generan en los primeros minutos del ensayo, con posterioridad se observa el pasaje de agua clara a través del sistema.

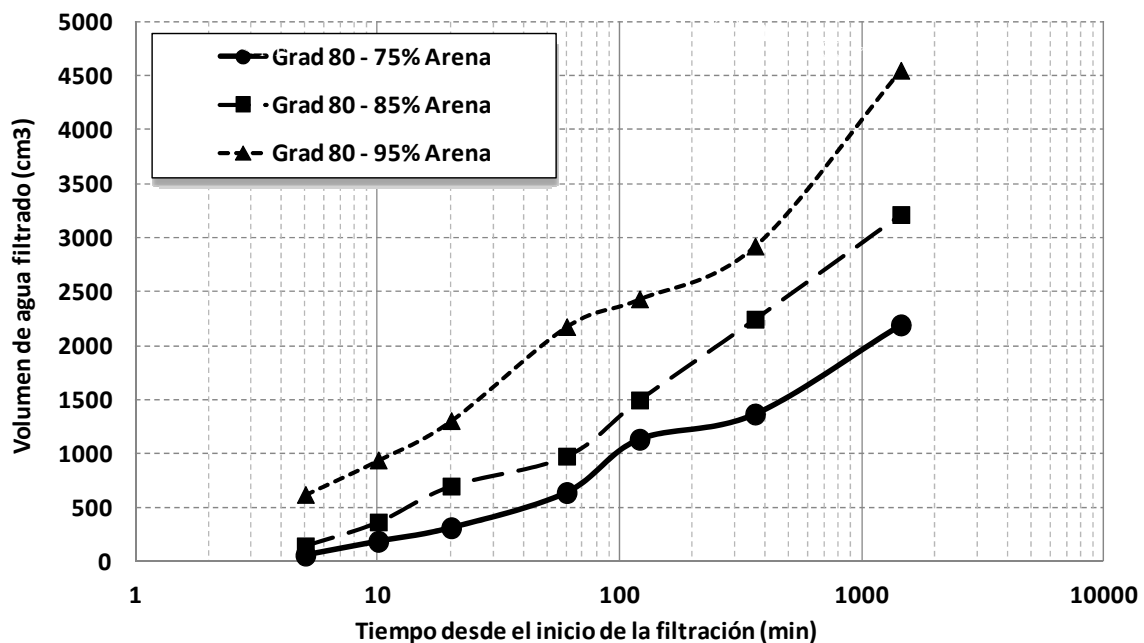


Figura 15a: Evaluación del volumen de agua filtrado, representado en escala logarítmica.

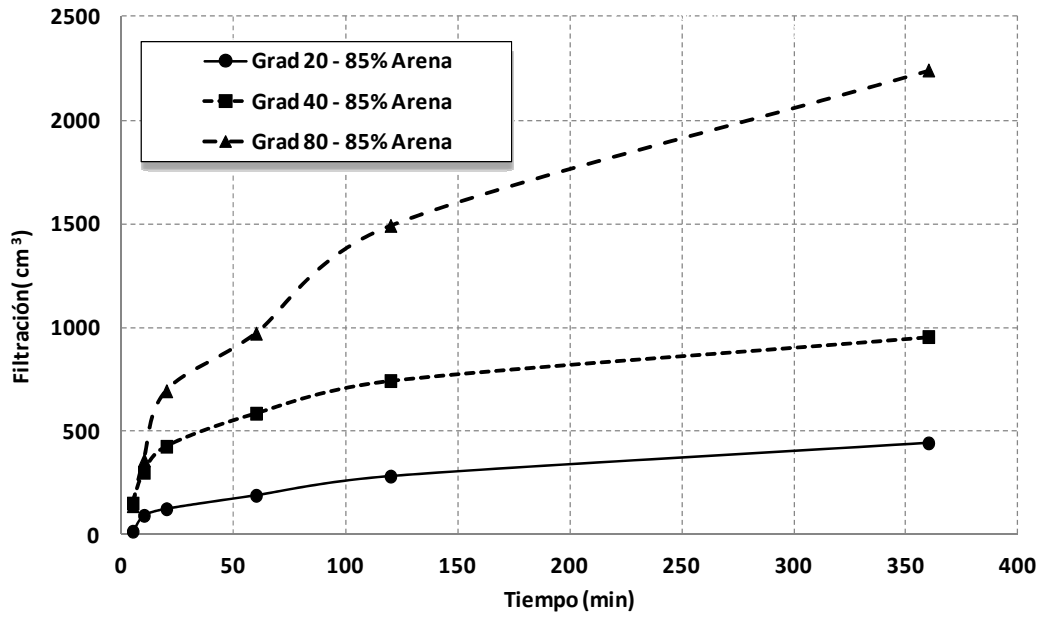


Figura 15b: Representación de la evolución del volumen filtrado, representado en escala natural.

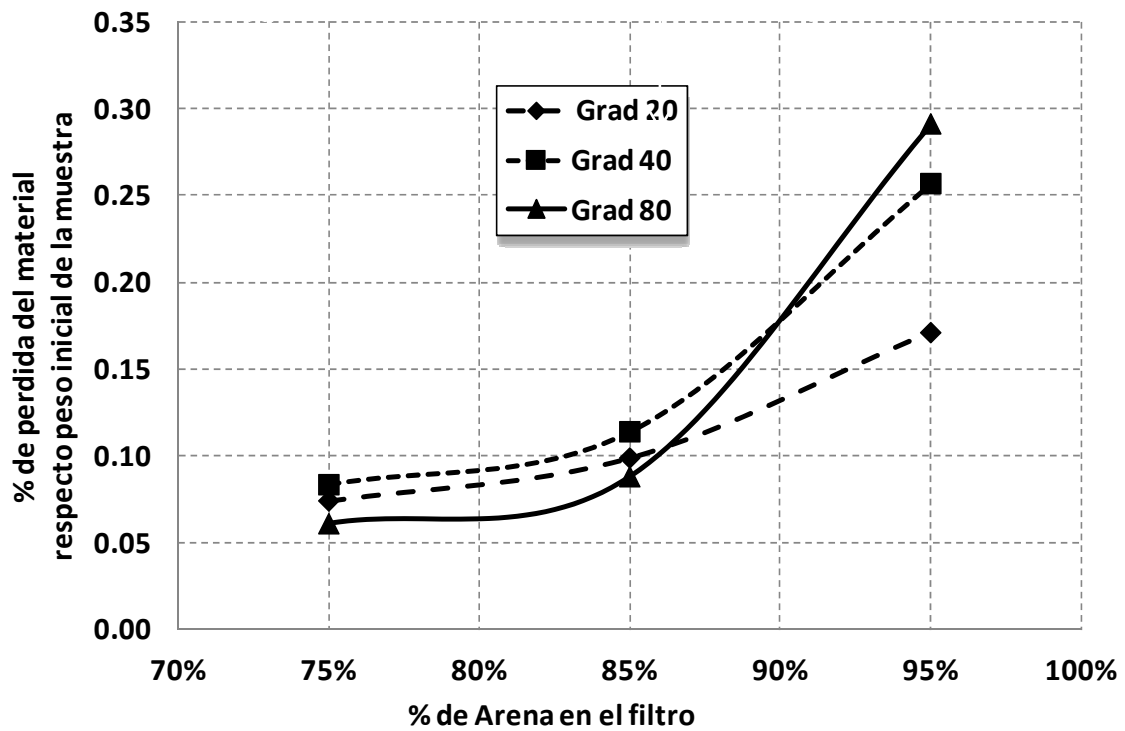


Figura 16: Pérdidas de materiales sólidos en el ensayo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el desarrollo de esta instancia de la investigación realizada pueden sintetizarse en las siguientes consideraciones finales:

Los suelos limo arenosos de baja plasticidad, típicos de la formación loésica del centro del país, se localizan, según los estudios de algunas referencias internacionales de uso frecuente, en el límite del comportamiento estable, en relación con los fenómenos de sufusión.

Se ha efectuado un conjunto de ensayos que ponen a prueba la metodología de trabajo propuesta, permitiendo la formulación de un protocolo de aplicación para la realización en forma sistemática de estos análisis. Las modalidades de ensayo propuestas se relacionan tanto con la definición de las características del filtro de aplicación sobre el suelo de base compactado, como para la identificación del comportamiento del propio suelo de base, frente a distintos valores de tensiones de corte generadas por el flujo circulante.

Las recomendaciones de uso frecuente, indican que los materiales de filtro que deben emplearse, no deberían contener importantes fracciones de suelos finos (pasantes del tamiz 200), procurando que estas sean inferiores al 5%. Los estudios aquí realizados han empleado fracciones superiores a las antes indicadas, experimentando resultados aceptables, siempre que la combinación sea con el propio suelo de base, y siempre que el pasante por el tamiz 200 no sea superior al 30%.

Se ha apreciado que el fenómeno de erosión está vinculado con la tensión de corte generada por el flujo. El flujo, que genera una tensión de corte a través del medio poroso, provoca niveles de erosión asociados con la magnitud de la tensión, y por consiguiente, con el valor de la carga hidráulica aplicada. En consecuencia, en las aplicaciones de tipo prácticas, fijado el nivel de erosión considerado admisible, se puede valorar si el mismo puede ser satisfecho por la carga hidráulica a aplicar sobre el suelo compactado. De no ser así, el mismo requerirá la aplicación de acción de control de la erosión, a través del empleo de los correspondientes filtros.

Los estudios realizados, constituyen el inicio de los procesos de investigación, para el mejoramiento del conocimiento en el desarrollo de la erosión interna en suelos limo arenosos compactados, de abundancia en la zona central de la llanura Argentina, y que resultan muy empleados en la constitución de diversas obras de ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el patrocinio de la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba.

REFERENCIAS

- ASTM. D4647-93 (2006). "Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test", D4647, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Bakker, K.J.; Breteler, M.K. y Den Ade, H. (1993). "New criteria for granular filters and geotextile filters under revetments", *Coastal Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 1524-1537
- Bendahmane, F., Marot, D., Alexis, A. (2008). "Experimental parametric study of suffusion and backward erosion", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 57-67.
- Briaud, J.L., Chen, H. C., Nurtjahyo, P., Kwak, K., Han, S. W. (1999a). "Bridge scour in cohesive materials", Interim Rep. on NCHRP, Project 24-15, NCHRP, Washington, D.C.
- Briaud, J.-L., Ting, F. C. K., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., Wei, G. (1999b). "Sricos: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 4, pp. 237-246.
- Briaud, J.L., Ting, F., Chen, H., Cao, Y., Han, S., and Kwak, K. (2001). "Erosion function apparatus for scour rate predictions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 2, pp. 105-113.

- Buraschi, J. y Pujol, A. (1999). "Dique Río Hondo: evaluación del comportamiento actual a 40 años de su puesta en operación", *I Congreso Argentino de Grandes Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos*, San Martín de los Andes, Neuquén, Argentina, Vol. 1, pp. 311-320.
- Burenkova, V.V. (1993). "Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils", in: *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Brauns, J., Heibbaum, M., & Schuler, U., Eds., Balkema, Rotterdam, pp. 357-360.
- Chapuis, R. P., Contant, A. y Baass, K. A. (1996). "Migration of fines in 0–20 mm crushed base during placement, compaction, and seepage under laboratory conditions", *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 33, No 1, pp.168-176.
- Chevalier, C., Haghighi, I., Pham, T. L., y Reiffsteck, P. (2010). "Two complementary tests for characterizing the soil erosion", *5th International Conference Scour Erosion*, ASCE, Reston, Virginia, pp. 152-161.
- Delage, P., Cui, Y. J. y Antoine, P. (2005). "Geotechnical problems related with Loess deposits in Northern France", *Proceedings of International Conference on Problematic Soils*, Vol. 2, pp. 1-23.
- Delgado, F. y Locke, M. (2000). "Design of granular filters: Guidelines and recommendations for laboratory testing", In: *Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering. Proceedings of the 3rd International Conference Geofilters 2000*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- De Mello, V. F. B. (1975). "Some lessons from unsuspected, real and fictitious problems. In: Earth Dam Engineering in Brazil", *VI Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Durban, South Africa.
- Fell, R., Mac Gregor, P., Stapledon, D. y Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*, Taylor and Francis, London, UK, Chapter 10. The mechanics of internal erosion and piping, pp. 418-439.
- Foster, M. y Fell, R. (1999). "Assessing embankment dam filters which do not satisfy design criteria", Report No. r-376, School of Civil and Environmental Engineering, University of South Wales, Sydney, Australia.
- Foster M. y Fell R. (2000). "A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, pp. 1025-1061.
- Foster M. y Fell, R. (2001). "Assessing embankment dams, filter who do not satisfy design criteria", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, pp. 398-407.
- Grandi, A., Riva, J., Bolognesi, A., Moretto, O. (1961). "Earth dams in Argentina", *Proc. V International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, France, Vol. 2, pp. 613-618.
- Haghighi, I., Chevallien, C., Duc, M., Guédon, S. y Reiffsteck, P. (2013). "Improvement of hole erosion test and results on reference soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, pp. 330- 339.
- Indraratna, B. (2007). "Constriction-based retention criterion for granular filter design", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, pp. 266-276.
- Indraratna, B., Muttuvel, T., Khabbaz, H. y Armstrong, R. (2008). "Predicting the erosion rate of chemically treated soil using a process simulation apparatus for internal crack erosion", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, pp. 837- 844.
- Indraratna, B., Trong Nguyen, V. y Rujikiatkamjorn, C. (2011). "Assessing the potential of internal erosion and suffusion of granular soils", *Faculty of Engineering - Papers* (2011): 550-554.
- Istomina, V.S. (1957). "*Filtration Stability of Soils*", Gostroizdat, Moscow, Russia.
- Kenney, T. C., Lau, D. (1986). "Internal stability of granular filters: Reply", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 23, pp. 420-423.

- Kezdi, A. (1969). "Increase of protective capacity of flood control dikes", Department of Geotechnique, Technical University, Budapest, Hungary, Report, 1969-1.
- Khor, C.H. y Woo, H.K. (1989). "Investigation of crushed rock filter for dam embankment", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 3, pp. 399-412.
- Kovacs, G. (1981). *Seepage Hydraulics*, Elsevier Scientific, Amsterdam, The Netherlands.
- Li, M. y Fanni, R. J. (2013). "Capillary tube model for internal stability of cohesionless soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No. 5, May 1, 2013.
- Lubochkov, E. A. (1965). "Graphical and analytical methods for the determination of internal stability of filters consisting of noncohesive soil", *Izvestia VNIIG*, Vol. 78, pp. 255-280.
- Lutenegger, A. (2012). "Collapse sensibility of midcontinent and lower Mississippi Valley loess", *GeoCongress 2012*, pp 880-889.
- Moll, L. y Rocca, R. (1991). "Properties of loess in the center of Argentina", *IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Chile, Vol. 1, pp. 1-13.
- Moretto, O., Bolognesi, A., López, A. y Nuñez, E. (1963). "Propiedades y comportamiento de un suelo limoso de baja plasticidad", *Proceedings of the II Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brasil, Vol II, pp.131-146.
- Park, Y., Brandon, T. L. y Duncan, J. M. (2003). "Investigation of the Ability of Filters to Stop Erosion through Cracks in Dams", Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia.
- Perry, E. (1991). "Comments on the Teton dam (Idaho) Failure: problems with the use of loess material in earth dam structures", *Engineering Geology*, Vol 31, No 2, pp. 205-206.
- Reddi, L. N., Lee, I., y Bonala, M. V. S. (2000). "Comparison of internal and surface erosion using flow pump test on a sand-Kaolin mixture", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 116-122.
- Reginatto, A. (1970). "Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba", 2º RAMSIF, Córdoba, Argentina.
- Rinaldi, V., Rocca, R. y Zeballos, M. (2007). "Geotechnical characterization and behavior of Argentinean collapsible loess", in: *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan, T.S. et al., Eds., Balkema, London, Vol. 4, pp. 2259-2286.
- Rocca, R.J., Redolfi, E. y Terzariol, R.E. (2006). "Características geotécnicas de los loess de Argentina", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura*, Vol. 6, No. 2, pp. 149-166.
- Rocca, R.J.; Zeballos, M.E, Terzariol, R.E y Terzariol, M. (2010). "Uso de limos loésicos como material de núcleo de presa", *XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Mendoza, Argentina.
- Sherard, J.L. y Dunnigan, L.P. (1989). "Critical filters for impervious soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, pp. 927-947.
- Smalley, I. y Dijkstra, T. (1991). "The Teton dam (Idaho) Failure: problems with the use of loess material in earth dam structures", *Engineering Geology*, Vol. 31, No. 2, pp. 197-203.
- Wang, M. y Bai, X. (2006). "Collapse property and microstructure of loess", in: *Advances in Unsaturated Soil, Seepage and Environmental Geotechnics*, Proceedings of Sessions of GeoShanghai, Shanghai, China, pp. 111-118.
- Wan, C. F., Fell, R. (2008). "Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 3, pp. 401-407.