

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Avances recientes en el diseño de filtros para presas de tierra y enrocamiento.
<i>Autor / Adscripción</i>	Raúl Flores Berrones Ivar Gaytán Colín Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 20(2): 79-94
<i>Fecha de publicación</i>	2005
<i>Resumen</i>	Se presenta una revisión de los criterios para el diseño y construcción de filtros requeridos para la seguridad de presas de tierra y enrocamiento, principalmente para evitar la falla por tubificación. Se describen los últimos avances en el ámbito internacional en este tema y se presentan los resultados de una reciente investigación experimental en el laboratorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1282">http://hdl.handle.net/123456789/1282</a>

# Avances recientes en el diseño de filtros para presas de tierra y enrocamiento

Raúl Flores-Berrones  
Ivar Gaytán-Colin

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Se presenta una revisión de los criterios para el diseño y construcción de filtros requeridos para la seguridad de presas de tierra y enrocamiento, principalmente para evitar la falla por tubificación. Se describen los últimos avances en el ámbito internacional en este tema y se presentan los resultados de una reciente investigación experimental en el laboratorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), siguiendo el criterio de Sherard y Dunnigan. Tomando en cuenta el estado actual del conocimiento en esta materia, se dan varias recomendaciones para revisar la seguridad de las presas que fueron construidas con filtros cuyos diseños fueron inadecuados, o bien porque el control en su construcción no fue el adecuado. También se proporcionan las recomendaciones que deberán seguirse para el diseño y construcción de filtros en los nuevos proyectos de presas y bordos.*

**Palabras clave:** tubificación, seguridad de presas, diseño de filtros, presas de tierra y enrocamiento, flujo de agua.

## Introducción

Las presas de tierra y enrocamiento son las obras de ingeniería civil que sin duda han tenido más impacto en el desarrollo y bienestar de la humanidad, principalmente en lo que se refiere a suministro de agua a las ciudades e industrias, riego agrícola, generación de energía, control de inundaciones, etcétera. Un elemento clave para la seguridad y el correcto funcionamiento de estas presas se refiere al diseño y construcción de los filtros graduados que deben instalarse en ellas (ilustración 1). El no hacerlo ha implicado fallas catastróficas causantes de tremendas pérdidas económicas y humanas (Peck, 1976).

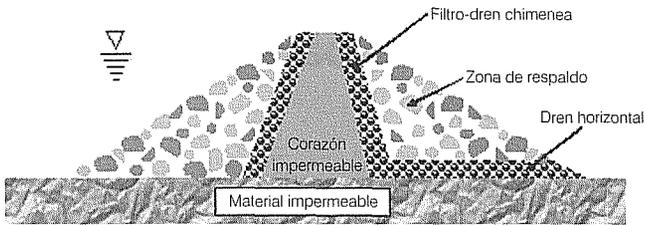
Los filtros deben cumplir varias funciones; entre ellas destacan las siguientes:

1. Prevenir accidentes y fallas debidos a la erosión interna de suelos en cortinas de tierra y enrocamiento.

2. Controlar el flujo del agua y las presiones hidrostáticas aguas abajo de una cortina.
3. Mejorar la estabilidad para diferentes condiciones de carga (por gravedad, sismo, presión del agua, etcétera).
4. Autosellar el corazón impermeable cuando ocurran fisuras o agrietamientos debidos a movimientos sísmicos, asentamientos diferenciales, etcétera.

Karl Terzaghi, fundador de la mecánica de suelos moderna, fue quien primero propuso un criterio para el diseño de estos filtros (Terzaghi, 1929), y durante muchos años dicho criterio se utilizó para el análisis y construcción de las principales presas de México (Marsal y Reséndiz, 1975) y en el mundo entero; dicho criterio está fundamentado en análisis granulométricos, tanto del material base que trata de protegerse (por ejemplo, el del corazón impermeable en la cortina de la ilustración 1), como del material que constituye el filtro. Sin embargo, investigaciones posteriores indican

**Ilustración 1. Localización de filtros-drenes en una presa de materiales graduados.**



que las recomendaciones originales de Terzaghi eran conservadoras y era importante complementarlas con recomendaciones relacionadas con la colocación, compactación y control de calidad durante la construcción de filtros (Bertram, 1940; Casagrande, 1937; Cedergren, 1989).

En fechas más recientes (USBR, 2000; USACE, 2000; ICOLD, 1994) se han propuesto criterios complementarios al original de Terzagui, y se han generado algunos otros basados en pruebas directas de laboratorio (Sherard y Dunnigan, 1989; Wan *et al.*, 2002; Flores y Gaytán, 2003). En este sentido, vale la pena revisar el estado de avance en la materia, su significado en la seguridad de las presas que se diseñaron y construyeron con criterios tradicionales, y conocer las recomendaciones a seguir para la construcción de futuras presas, o reparar aquellas que se encuentran en estado latente de fallar por tener filtros construidos con criterios inadecuados, o cuyos procedimientos constructivos resultaron fuera de especificaciones.

Este artículo presenta los antecedentes relacionados con el origen del criterio inicial propuesto por Terzagui desde 1929, su evolución a partir de los resultados experimentales, y una descripción de los criterios recientes. Se presentan los resultados de investigaciones efectuadas en los últimos cinco años, y se dan varias recomendaciones para obtener un diseño y construcción de filtros adecuados.

### Antecedentes

Existe un gran número de causas por las cuales se han tenido fallas o problemas relacionados con el comportamiento de presas; entre ellas destacan el fenómeno de tubificación y la sobrepresión del agua en algunos de los elementos que constituyen la cortina. Para evitar o solucionar esta clase de problemas, todas las superficies de descarga de agua que sean susceptibles a la tubificación o a la inestabilidad por exceso de subpresión de agua debieran estar protegidas

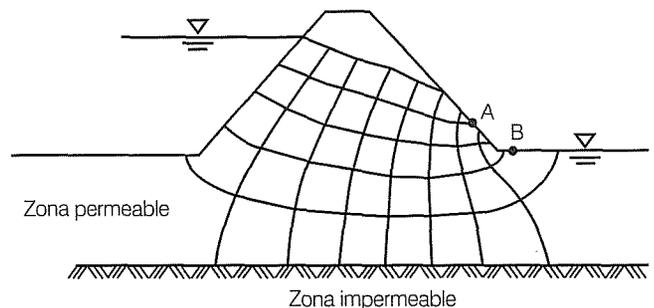
por un filtro que permita, por un lado, la salida libre del agua que llega a pasar el corazón impermeable y, por el otro, impedir el paso de las partículas de suelo que constituyen el propio cuerpo de la cortina o de su cimentación.

La ilustración 2 muestra, mediante el trazo de una red de flujo, un par de sitios de una presa de tierra homogénea, a través de los cuales se puede presentar el fenómeno de tubificación. Este fenómeno, responsable de aproximadamente 50% de las fallas registradas en presas de tierra y enrocamiento (Foster y Fell, 1999), consiste en la remoción y acarreo de las partículas del suelo por el paso de un flujo de agua. Ello ocurre cuando las fuerzas del flujo sobrepasan las de gravedad y cohesión que tratan de mantener adheridas entre sí a las partículas de suelo.

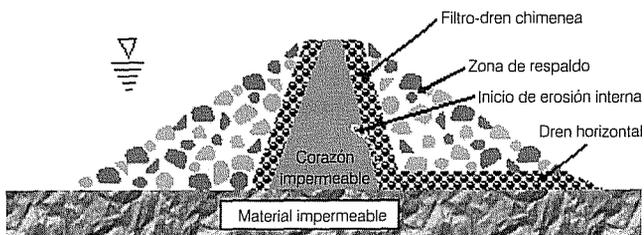
La tubificación puede ocurrir por tres diferentes procesos (Foster y Fell, 2001):

1. Erosión hacia atrás (regresiva), cuando el proceso se inicia a la salida del flujo del agua y se produce una erosión que aumenta hacia donde proviene el flujo, formándose un tubo (ver ilustración 3).
2. Concentración de flujo de agua, cuando existe una grieta o capa de suelo más permeable (por ejemplo, una capa mal compactada en el terraplén de la cortina o un estrato más permeable en la cimentación), de suerte que existe una cierta liga entre la fuente de agua y el sitio donde se origina el escape de agua. En este caso, la erosión se inicia en las paredes donde se tiene la concentración del flujo.
3. Erosión interna por el lavado de finos en suelos que tienen una granulometría muy dispersa, o bien en suelos granulares gruesos donde el contenido y las características de los finos es tal que se pueden remover fácilmente al paso de un flujo de agua.

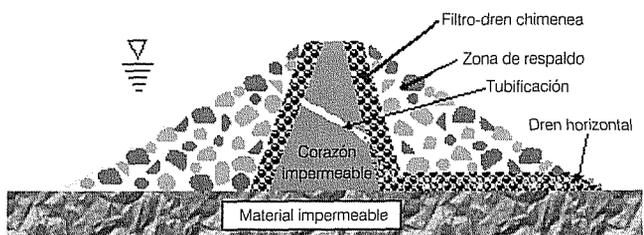
**Ilustración 2. Red de flujo a través de un terraplén y su cimentación, considerando una misma permeabilidad en ambos elementos. Los puntos A y B corresponden a sitios donde puede ocurrir tubificación a través del terraplén y su cimentación.**



**Ilustración 3a. Inicio de la erosión.**



**Ilustración 3b. Formación del tubo.**



Existen varios factores que influyen en el proceso de la erosión interna y la tubificación, entre ellos destacan los siguientes:

*Suelos que constituyen el corazón impermeable.* Los suelos finos no plásticos sueltos, como los limos y arenas finas o medianas, son, sin duda, los más susceptibles a la remoción y acarreo con el agua, principalmente en sitios donde los gradientes hidráulicos son altos. En el caso de los suelos arcillosos dispersivos, son también muy susceptibles a experimentar tubificación al entrar en contacto con el agua, razón por la cual es importante investigar química y físicamente las propiedades de los suelos que se pretenden utilizar en el corazón impermeable de las presas. Estudios recientes (Silva, 2003) muestran el efecto que pueden tener también las sales en el grado de dispersividad que adquieren algunas arcillas al sujetarse al flujo del agua. Obviamente, el contenido de finos y el grado de plasticidad de los suelos que se utilizan para construir el cuerpo impermeable de una presa son factores cuya influencia debe analizarse en el laboratorio a través de pruebas físicas (Gaytán, 2004).

*Suelos en la cimentación y las laderas de una cortina.* Al igual que los suelos empleados en el corazón impermeable, el efecto que puede tener el paso del agua por estos suelos depende de la granulometría, orientación, estratificación, permeabilidad, e incluso en su origen. Cuando se trata de suelos granulares,

como las arenas, gravas y limos, el grado de su compactación relativa, contenidos de finos y grado de cementación entre los granos, son factores que están directamente relacionados con la susceptibilidad de la tubificación. Por otro lado, la resistencia al esfuerzo cortante y la compresibilidad de los depósitos de suelo que constituyen la cimentación tienen influencia en los asentamientos y agrietamientos que puede experimentar una cortina de tierra y/o enrocamiento; a través de estos agrietamientos se puede iniciar el proceso de erosión y con él, el de tubificación. Cuando el material que constituye la cimentación es roca fisurada o intemperizada, este problema puede también ocurrir a través de esas fisuras; más aún, cuando los esfuerzos hidráulicos al nivel de las fisuras resultan mayores a lo que se tiene *in situ*, puede ocurrir lo que se conoce como fracturamiento hidráulico, el cual, a su vez, induce a un incremento en los gradientes del flujo de agua y, con ello, a la tubificación (Peck, 1976). Finalmente, la dispersividad de los depósitos del suelo de la cimentación y el efecto que puedan tener las sales del agua del embalse al circular por dichos depósitos son factores que deben tomarse en cuenta en la posibilidad de que a corto o mediano plazos ocurra la tubificación a través de esos depósitos.

*Materiales de respaldo aguas abajo de la cortina.* Puesto que la cara aguas abajo de la cortina y el material que constituye el pie de la cortina son los sitios donde mayor gradiente hidráulico de salida se puede presentar y, por tanto, donde el proceso de erosión se puede iniciar (ver ilustración 2), la susceptibilidad a la tubificación de los materiales que constituyen esos sitios debe analizarse con especial cuidado. Es decir, se debe cuidar no solamente que dichos materiales no sean susceptibles a erosionarse (ver cuadro 1), sino además, de que existan zonas de transición entre el material fino del corazón impermeable y el enrocamiento que constituye la cara aguas abajo de la cortina. En especial, en el contacto de la cara aguas abajo del corazón impermeable es precisamente donde se debe instalar un filtro de material graduado que impida la erosión interna del suelo que forma el corazón impermeable y que, a su vez, permita un drenaje libre al agua que llega a pasar a través de dicho corazón.

*Presencia de tuberías y conductos.* Aproximadamente el 50% de las fallas por tubificación están asociadas con la presencia de conductos que atraviesan el terraplén de la cortina (Foster y Fell, 2000). Es común que no exista una buena compactación alrededor de ellos, lo cual hace que la permeabilidad aumente significativamente

y, con ello, el inicio del proceso de erosión fácilmente toma lugar.

Otros factores no menos importantes que deben considerarse son: a) el grado de compactación y la homogeneidad lograda al construir el corazón impermeable de la cortina; b) el contenido de agua respecto al óptimo al momento de compactar los diferentes materiales de la cortina; cuando se compacta el material del corazón impermeable del lado seco respecto al óptimo, la susceptibilidad a la erosión interna es mayor, c) irregularidades en el terraplén de la cortina (presencia de conductos o agujeros hechos por animales o raíces, zonas deficientemente compactadas, grietas por asentamientos diferenciales o sismos, etcétera) o en la cimentación (excavaciones muy estrechas o verticales, perfiles de la cimentación donde puede inducirse un fracturamiento hidráulico, etcétera); d) altos niveles del embalse y gradientes hidráulicos de salida, capaces de producir inestabilidad y erosión interna; debe evitarse tener valores del gradiente hidráulico cercanos o mayores a la unidad ( $i_h=1$ ), ya que, como se demuestra en otros trabajos (Flores *et al.*, 2003; Casagrande, 1967), dicho valor corresponde al gradiente llamado crítico, el cual hace que los esfuerzos efectivos en el suelo sean nulos por efecto de las fuerzas de flujo.

### Criterios actuales para el diseño de filtros

Terzaghi (1929) propuso por primera vez un criterio granulométrico que debiera cumplir todo filtro, a fin de satisfacer simultánea y adecuadamente las siguientes dos condiciones: a) que no permita el paso de las partículas del suelo que constituye el corazón impermeable al momento que circula agua a través de éste; b) que sea suficientemente más permeable que el corazón impermeable de manera que dé salida rápida al flujo del agua que logró atravesarlo y no se acumulen presiones de agua que pongan en riesgo la estabilidad de la obra. Este criterio se sintetiza mediante la siguiente expresión:

$$D_{15}^F/D_{85}^S < 4 < D_{15}^F/D_{15}^S \quad (1)$$

Donde  $D_{15}^F$  es el diámetro característico del material de filtro correspondiente al 15% de la curva granulométrica, mientras que  $D_{15}^S$  y  $D_{85}^S$  son los diámetros del suelo base por proteger y corresponden al 15 y 85%, respectivamente, de su curva granulométrica. Bertram (1940) analizó experimentalmente la efectividad del criterio señalado por la ecuación (1) y encontró que

dicha expresión se encontraba muy del lado conservador, por lo que recomendó utilizar el valor de cinco en vez de cuatro que aparece en ella. Es precisamente la ecuación (1), con el valor de cuatro o cinco, la que se ha venido utilizando más comúnmente en México y en el resto del mundo.

La parte izquierda de la ecuación (1), conocida como "relación de tubificación", representa el requisito de retención y significa que las partículas del suelo por protegerse no pasarán a través del filtro si se cumple que:

$$D_{15}^F/D_{85}^S < 4 \quad (2)$$

La parte derecha de la ecuación (1) corresponde al requisito hidráulico, el cual establece que el diámetro característico del filtro,  $D_{15}^F$ , debe ser mayor a cuatro (o cinco) veces el diámetro característico del suelo que se desea proteger, a fin de permitir un flujo libre del agua y tener un control adecuado de las fuerzas de flujo. Considerando que la permeabilidad es proporcional al cuadrado de estos diámetros característicos, la satisfacción de esta relación de diámetros ( $D_{15}^F/D_{15}^S > 4$ ) significa que la permeabilidad del filtro deberá ser del orden de veinte veces la permeabilidad del suelo base. La ilustración 4 muestra el rango en que debe quedar la granulometría del filtro, a fin de satisfacer los dos requisitos que marca el criterio de Terzaghi.

En 1994, el Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 1994) dio varias recomendaciones que debieran aplicarse a fin de satisfacer adecuadamente los dos requisitos señalados por el criterio de Terzaghi. Estas recomendaciones se reproducen en el cuadro 1 y son muy similares a las señaladas por Cedergren (1973). Por otro lado, seis años después a las recomendaciones de la ICOLD, el USBR (*United States Bureau of Reclamation*, 2000) publica su criterio para diseñar filtros en presas de tierra y enrocamiento. Para el caso de cortinas de tierra o bordos de bajo riesgo, o bien estructuras hidráulicas no muy importantes, el USBR (2000) recomienda aplicar el criterio de Terzaghi, tal como se indica en la ecuación (1), junto con las recomendaciones complementarias de la ICOLD (cuadro 1); señala, además, los siguientes requerimientos:

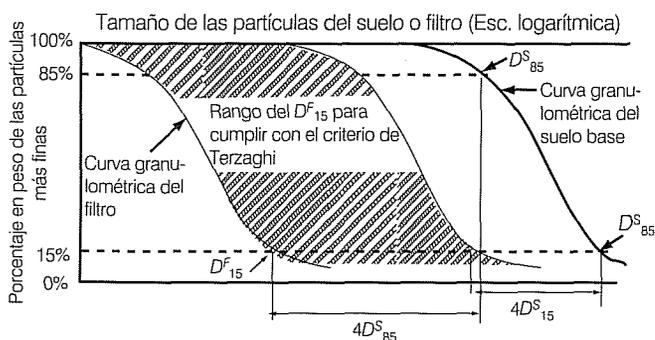
1. A fin de evitar la segregación durante el manejo, transporte y colocación del material, la granulometría del filtro debe ser homogénea, de manera que se cumpla que:

$$2 < Cu \leq 8 \quad (3)$$

donde  $Cu = D_{60}^F / D_{10}^F =$  coeficiente de uniformidad. Lo anterior significa que la curva granulométrica del filtro no tiene que ser paralela o similar a la forma de la curva granulométrica del material base. El USBR especifica que la curva granulométrica del filtro no debe tener espacios vacíos, discontinuidades o cambios bruscos en la curvatura que indiquen la ausencia de ciertos tamaños de grano; esto puede requerir limitar el rango de los tamaños de grano en el filtro, de manera que se establezcan valores máximos y mínimos. Para el caso de arenas cuyo  $D_{90} < 20$  mm, no se requiere de estos límites, pero para el caso de filtros más gruesos y con gravas, se sugiere que la relación  $D_{90}^F / D_{10}^F$  se mantenga en los límites dados por el cuadro 2.

- 1) Para asegurar una adecuada permeabilidad en el filtro, se debe cumplir que  $D_{15}^F \geq 5D_{15}^S$ , pero no menor a 0.1 mm. Además, el contenido de finos que pasa la malla 200 no debe ser mayor al 5%. La

**Ilustración 4. Criterio gráfico de Terzaghi para determinar un filtro (Flores y Gaytán, 2003).**



**Cuadro 1. Recomendaciones dadas por ICOLD (1994) para cumplir el criterio de Terzaghi.**

Recomendaciones dada por ICOLD (1994), para cumplir el criterio de Terzaghi
1 Evitar la segregación durante el proceso, manejo, colocación, tendido y compactación del material de filtro. La granulometría del filtro debe ser lo suficientemente homogénea, de manera que, con el cuidado apropiado en campo, la segregación sea evitada al colocarse en el sitio, en especial en la interfaz con los materiales adyacentes.
2 Evitar el cambio en la granulometría (rompimiento de granos o degradación) durante el proceso, manejo, colocación, tendido y compactación; o evitar la degradación con el tiempo debido a ciclos de heladas y deshielos, o flujo del agua. Las partículas del material del filtro deben ser resistentes al desgaste y durables.
3 No debe haber cohesión real o aparente, o la posibilidad de cementación como consecuencia de acciones físico-químicas o biológicas. El filtro debe permanecer sin cohesión, de manera que no exista la posibilidad de agrietamiento, a pesar de que la zona del corazón impermeable aledaña pueda experimentar algún daño por agrietamiento.
4 Debe ser internamente estable, es decir, la fracción gruesa del filtro con respecto a la fracción fina debe cumplir con el criterio contra la tubificación.
5 Tener suficiente capacidad de descarga, de manera que el agua que entra al sistema del filtro sea desalojada rápidamente y con seguridad, con poca pérdida de carga. En este sentido, los drenes de chimenea y los horizontales deben diseñarse con una amplia capacidad de descarga. El diseño de filtros y drenes debiera considerar el peor de los escenarios, como puede ser el rompimiento del corazón impermeable, fracturamiento hidráulico o la segregación en el corazón impermeable.

permeabilidad  $k$  de un filtro debe ser al menos 25 veces la del material base. En el caso de filtros de arenas uniformes o moderadamente bien graduados con gravas, el coeficiente de permeabilidad  $k$  se puede estimar mediante la siguiente expresión empírica:

$$k = 0.35 (D_{15}^F)^2 \quad (4)$$

Donde  $D_{15}^F$  está en milímetros y  $k$ , en centímetros sobre segundos.

Cuando se trata de presas más importantes y de mayores riesgos, el USBR (2000) hace varias recomendaciones que se sintetizan en el cuadro 3. Acompañan a este cuadro otras medidas preventivas, como la de proveerse de un segundo filtro en las zonas de arcilla y limos de un corazón impermeable, a fin de asegurar que los filtros de grano fino, adyacentes al corazón, permanezcan estables y con capacidad de descarga hidráulica, a pesar de los posibles agrietamientos internos que pueda experimentar la

**Cuadro 2. Límites para la prevención de segregación  $D_{10}^F$  y  $D_{90}^F$  (USBR, 2000).**

$D_{10}^F$ mínimo (mm)	$D_{90}^F$ máximo (mm)	$D_{90}^F / D_{10}^F$
< 0.5	20	40
0.5 - 1.0	25	25
1.0 - 2.0	30	15
2.0 - 5.0	40	8
5.0 - 10	50	5
10 - 50	60	2

cortina. En el caso de tener suelos naturales con granulometría discontinua o demasiado amplia (por ejemplo, existencia de gravas y arcillas con poca o nula presencia de limos o arenas), el USBR recomienda diseñar los filtros considerando proteger la matriz fina del suelo base, en vez de considerar el rango total de los tamaños de suelo; tratándose de suelos heterogéneos, como es el caso de depósitos naturales donde aparecen estratificaciones separadas de limos, arenas, arcillas o gravas, se recomienda utilizar filtros de dos capas (un filtro fino seguido de uno más grueso). En cualquiera de estos casos especiales, el USBR recomienda verificar la eficiencia de los filtros llevando a cabo pruebas de laboratorio como las recomendadas por el Comité Internacional de Grandes Presas.

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América (USACE, 2000) aplica un criterio muy semejante al del USBR; la clasificación de los grupos de suelo es exactamente la misma y las diferencias más significativas entre los criterios de estas dos instituciones se indican en el cuadro 4.

En 1989, Sherard y Dunnigan publicaron los resultados de varias investigaciones efectuadas durante un periodo de diez años, donde se señalaron los inconvenientes de los criterios basados exclusivamente en la distribución granulométrica, tanto del suelo base como la del filtro. Entre esos inconvenientes está el que no existe una correlación única entre los tamaños de poro en la estructura del suelo base y los tamaños de las partículas del filtro, ya que factores como el grado

**Cuadro 3. Criterio USBR (2000).**

Categoría del suelo base	Porcentaje de finos en el suelo base mayor de 0.074 mm	Descripción del suelo base	Criterio del filtro <sup>(1)</sup>
1	>85	Arcillas y limos	$D_{15}^F \leq 9D_{85}^B$ <sup>(2)</sup>
2	40 - 85	Arenas, limos, arcillas y arenas arcillosas y/o limosas	$D_{15}^F \leq 0.7$ mm
3	15 - 39	Arenas y gravas limosas y arcillosas	$D_{15}^F \leq 0.7$ mm + $\frac{40-A}{40-15} (4D_{85}^B - 0.7$ mm) <sup>(3 y 4)</sup>
4	<15	Arenas y gravas	$D_{15}^F \leq 4D_{85}^B$ <sup>(5)</sup>

**Notas:**

$D_{15}^F$  = diámetro del material del filtro correspondiente al 15% en peso de la curva granulométrica.

$D_{85}^B$  = diámetro del material del suelo por proteger, correspondiente al 85% en peso de la curva granulométrica.

- Los filtros deben tener un tamaño máximo de partícula de 2" (50 mm) y un máximo de 5% que pasa la malla núm. 200 (0.074 mm), después de compactado, con un índice de plasticidad (IP) igual a cero. El IP se determina del material que pasa la malla núm. 40 (0.425 mm), de acuerdo con la norma USBR 5360, del *Manual de suelos*. Para asegurar suficiente permeabilidad, los filtros deben tener un  $D_{15}^F > 5D_{15}^B$ , pero no menor de 0.1 mm.
- Cuando  $9D_{85}^B$  es menor que 0.2 mm, utilizar 0.2 mm.
- A = porcentaje que pasa la malla núm. 200 (0.075 mm) después de cualquier regraduación.
- Cuando  $4D_{85}^B$  es menor de 0.7 mm, utilizar 0.7 mm.
- En la categoría 4, el  $D_{85}^B$  puede determinarse a partir de la curva granulométrica original del suelo base, sin hacer la corrección por la existencia de partículas mayores a 4.75 mm, siempre y cuando el suelo base no contenga una granulometría discontinua con intervalos ausentes de material intermedio.

**Cuadro 4. Diferencias entre el criterio USBR (2000) y USACE (2000).**

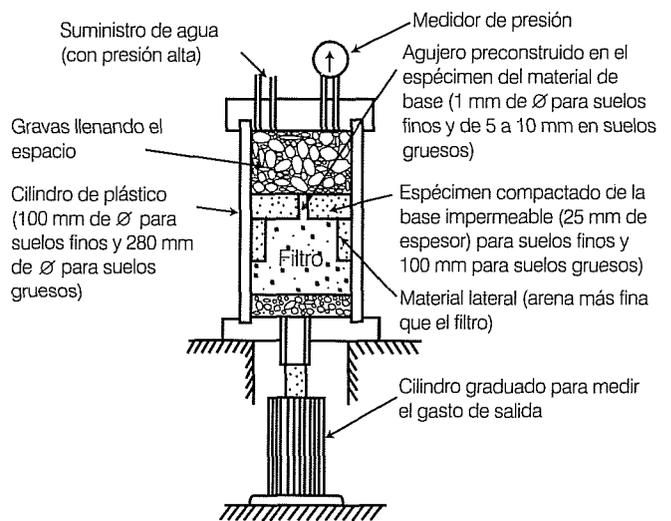
	USBR	USACE
Tamaño máximo de partícula	50 mm <sup>(2)</sup>	75 mm <sup>(3)</sup>
Categoría de suelo 4	$D_{15}^F \leq 4D_{85}^S$ Donde $D_{85}^S$ es obtenido de la curva de graduación original, suponiendo suelo que no tiene discontinuidades o que ésta sea de granulometría muy amplia.	$D_{15}^F \leq 4$ o $5D_{85}^S$ El criterio $4D_{85}^S$ debe ser usado cuando el filtro está debajo del enrocamiento de protección, sujeto a la acción de olas y drenaje, que puede estar sujeto al oleaje violento y/o vibración.
Para garantizar suficiente permeabilidad (criterio mín. $D_{15}^F$ )	Determinar el mín. $D_{15}^F \geq 5D_{15}^S$ , pero no menor que 0.1 mm	Determinar el mín $D_{15}^F \geq 3$ a 5 veces el $D_{15}^S$ máx. de la base del suelo antes de la regraduación, pero no menor que 0.1 mm.

de compactación y la forma de las partículas afectan también el tamaño de los poros; por otro lado, la efectividad de dichos criterios requiere de su verificación mediante pruebas de laboratorio. Tomando en cuenta estas limitaciones, Sherard y Dunnigan recomendaron el uso de la prueba no erosionable para determinar el filtro que debiera proteger a un suelo base específico. A través de esta prueba, dichos investigadores determinaron el tamaño del diámetro  $D^F_{15}$  del filtro frontera (denominándolo  $D^F_{15b}$ ), a partir del cual el material base que se analiza (correspondiente, por ejemplo, al corazón impermeable de una presa) no experimentará erosión alguna debida al flujo del agua. Ellos realizaron varias pruebas en los siguientes cuatro grupos de suelo base (mismos que resultaron semejantes a los especificados posteriormente por el USBR):

1. Limos finos y arcillas que pasan la malla # 200 en más de 85%.
2. Limos y arenas arcillosas, limos arenosos y arcillas que pasan la malla # 200 entre 40 y 85%.
3. Limos, arenas arcillosas y arenas con gravas que pasan la malla # 200 en sólo el 15% o menos.
4. Los suelos intermedios que se encuentran entre los grupos dos y tres.

La prueba consiste en preparar una muestra de suelo base en un dispositivo como el mostrado en la ilustración 5, al cual se le hace un orificio circular en el centro. Los espacios entre las partículas de grava colocada sobre el espécimen de suelo se llenan con agua, dejando escapar el aire a través del orificio existente en la parte superior del dispositivo de la ilustración 5. Se llevan a cabo varias de estas pruebas en cada espécimen de suelo base que se analiza, probando varios filtros cuya granulometría varía desde tamaños suficientemente finos como para impedir cualquier erosión, hasta tamaños más gruesos que permitan la erosión interna a partir del orificio del centro. El objetivo de realizar esta serie de pruebas es determinar el filtro frontera ( $D^F_{15b}$ ) para cada

**Ilustración 5. Figura de la prueba de filtro no erosionable (NEF) (Sherard y Dunnigan, 1989).**



suelo base, a partir del cual, en el filtro con tamaños de partículas más finos ya no se produce erosión alguna en el orificio central. De acuerdo con Sherard y Dunnigan, con esta metodología se logra definir el valor único del  $D^F_{15b}$  con una precisión del orden de 0.1 mm; por otro lado, la prueba es tan simple que se puede efectuar en cualquier laboratorio convencional de mecánica de suelos y en ella se puede probar todo el rango de suelos que se utilizan comúnmente en los corazones impermeables. El cuadro 5 muestra los filtros frontera ( $D^F_{15b}$ ) determinados mediante la prueba NEF, para los cuatro grupos de suelo antes señalados.

Posterior a la propuesta de la prueba NEF de Sherard y Dunnigan (1989), Foster y Fell (2001) analizaron los resultados experimentales obtenidos de observar el comportamiento que habían tenido los filtros de varias presas existentes, y los compararon con los resultados que ofrecía la aplicación de la prueba NEF para cada uno de los materiales de las presas estudiadas. Esta comparación mostró que el criterio NEF era conservador

**Cuadro 5. Determina con los límites de filtros ( $D^F_{15b}$ ) para diferentes contenidos de finos con los cuatro grupos de suelos base según la prueba NEF de Sherard y Dunnigan (1989).**

Grupo de suelo	Contenido de finos máximo a malla 200	Límite del filtro ( $D^F_{15b}$ ) determinado por la prueba
1	85 - 100	$D^F_{15b} = 7D^S_{85} - 12D^S_{85}$ (promedio $D^F_{15b} = 9D^S_{85}$ )
2	40 - 85	$D^F_{15b} = 0.7 - 1.5$ mm
3	0 - 15	$D^F_{15b} = 7D^S_{85} - 10D^S_{85}$
4	15 - 40	Intermedio entre el grupo 2 y 4, de acuerdo con el contenido de finos.

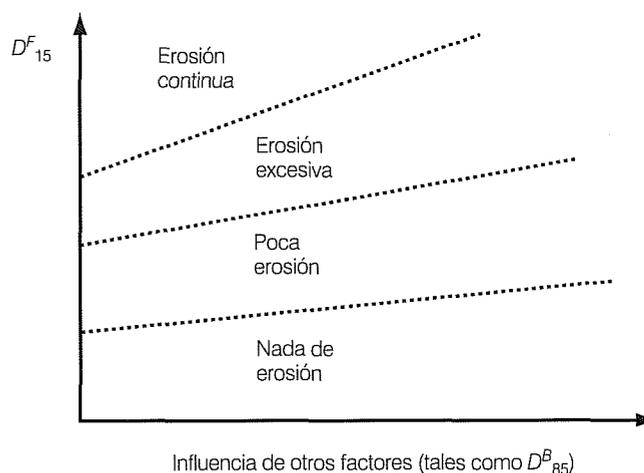
(en ocasiones muy conservador) y, por tanto, en él se involucraba un factor de seguridad al aplicarlo en el diseño de nuevas presas. Sin embargo, para la evaluación de la seguridad de presas existentes, Foster y Fell (2000) propusieron un nuevo criterio. El cuadro 6 muestra, en forma sintética, los resultados obtenidos de comparar los datos experimentales con los valores dados con el criterio de Sherard y Dunnigan, junto con el nuevo criterio propuesto por Foster y Fell (2001).

El criterio de Foster y Fell (2001) parte de que en el comportamiento de un filtro, definido a través de su  $D_{15}^F$ , existen las fronteras señaladas en la ilustración 6. Basados en los resultados de varias pruebas que estos autores efectuaron en la UNSW (University of New South Wales), y utilizando un equipo muy similar al utilizado por Sherard y Dunnigan, definieron estas fronteras de la siguiente manera:

- Frontera sin erosión; debajo de la cual prácticamente el filtro no permite erosión alguna (el peso de las partículas del suelo base que se remueve en la prueba es menor a 10 gramos del peso de la muestra original).
- Frontera con excesiva erosión; el filtro se llega a sellar después de haber dejado pasar una cierta cantidad de material base (del orden de 100 gramos).
- Frontera de erosión continua; a partir de esta frontera, el filtro permite que en forma más o menos continua exista erosión del material base a través de él.

Estos autores recomiendan el uso del cuadro 7 para definir los valores que debe tener el  $D_{15}^F$  en las fronteras de erosión excesiva y erosión continua, en función de las características granulométricas del suelo base.

**Ilustración 6. Desarrollo conceptual de los límites de erosión para una prueba de filtro (Foster y Fell, 2001).**



Foster y Fell (2001) hacen la siguiente clasificación del comportamiento de filtros, en función de los resultados de las pruebas frontera antes mencionadas:

1. Filtro que sella sin erosión: en el cual se produce un sellado rápido después de existir una fuga concentrada de agua sin ningún potencial de daño.
2. Filtro que sella con algo de erosión: el sellado se produce después de haber producido un cierto daño y donde la fuga del agua se incrementó en forma moderada.
3. Filtro con sellado parcial o sin sellado: con erosión grande debido a la presencia de una fuga de agua, con potencial de grandes pérdidas por erosión y grandes incrementos en la fuga del agua, así

**Cuadro 6. Criterio propuesto para el ensayo de filtros de límites o fronteras no erosionables (Foster y Fell, 2001).**

Grupo del suelo basea	Contenido de finos <sup>a</sup>	Criterio de diseño Sherard y Dunnigan	Rango experimental para $D_{15}^F$ para límite no erosionable	Criterio propuesto para el límite no erosionable por Foster y Fell
1	$\geq 85$	$D_{15}^F \leq 9D_{85}^B$	$6.4D_{85}^B - 13.5D_{85}^B$	$D_{15}^F \leq 9D_{85}^B$ <sup>b</sup>
2A	35-85	$D_{15}^F \leq 0.7$ mm	0.7-1.7 mm	$D_{15}^F \leq 0.7$ mm <sup>b</sup>
3	$< 15$	$D_{15}^F \leq 4D_{85}^B$	$6.8D_{85}^B - 10D_{85}^B$	$D_{15}^F \leq 7D_{85}^B$
4A	15-35	$D_{15}^F \leq (40 - C) *$ $(4D_{85}^B - 0.7)/25 + 0.7$	$1.6D_{15}^F - 2.5D_{15}^F$ del criterio de Sherard y Dunnigan	$D_{15}^F \leq 1.6D_{15d}^F$ , donde $D_{15d}^F = (35 - C) *$ $(4D_{85}^B - 0.7)/20 + 0.7$

<sup>a</sup> La subdivisión de los grupos de suelo 2 y 4 se modificó del 40% pasando partículas de 75  $\mu$ m, según recomendaciones de Sherard y Dunnigan (1989), a 35%, basado en el análisis de los datos en varias pruebas de filtros. Este porcentaje se refiere al suelo base una vez que el mismo se ha ajustado al tamaño máximo de partícula de 4.75 mm.

<sup>b</sup> Para suelos altamente dispersivos (con clasificación pinhole  $D1$  o  $D2$ , o erosión 1 o 2), se recomienda usar el valor menor de  $D_{15}^F$  de la frontera de no erosión; para suelos del grupo 1, usar el límite menor experimental ( $D_{15}^F \leq 6.4D_{85}^B$ ); y para suelos del grupo 2A, utilizar  $D_{15}^F \leq 0.5$  mm.  
C=porcentaje que pasa la malla 200 después del ajuste indicado en a.

Cuadro 7. Resumen de criterios propuestos para frontera excesiva y erosión continua (Foster y Fell, 2001).

Suelo base	Criterio propuesto para frontera de erosión excesiva	Criterio propuesto para frontera de erosión continua
Suelos con $D_{95}^B < 0.3$ mm	$D_{15}^F > 9D_{95}^B$	$D_{15}^F > 9D_{95}^B$
Suelos con $0.3 < D_{95}^B < 2$ mm	$D_{15}^F > 9D_{90}^B$	$D_{15}^F > 9D_{95}^B$
Suelos con $D_{95}^B > 2$ mm y contenido de finos $> 35\%$	En promedio $D_{15}^F > D_{15}^F$ , el cual da una pérdida de erosión de $0.25 \text{ g/cm}^2$ en pruebas CEF; o límite grueso $D_{15}^F > D_{15}^F$ , el cual da una pérdida de erosión de $1.0 \text{ g/cm}^2$ en pruebas CEF	$D_{15}^F > 9D_{95}^B$
Suelos con $D_{95}^B > 2$ mm y contenido de finos $< 15\%$	$D_{15}^F > 9D_{85}^B$	$D_{15}^F > 9D_{95}^B$
Suelos con $D_{95}^B > 2$ mm y contenido de finos 15-35%	$D_{15}^F > 2.5D_{15}^{\text{diseño}}$ , donde $D_{15}^{\text{diseño}} = (35 - \text{pp}\%75\mu\text{m}) (4D_{85}^B - 0.7)/20 + 0.7$	$D_{15}^F > 9D_{95}^B$

Nota: el criterio es directamente aplicable para suelos con  $D_{95}^B$  hasta de 4.75 mm. Para suelos con partículas más gruesas, determine  $D_{85}^B$  y  $D_{95}^B$  usando el clasificado de curvas adopladas para el tamaño máximo dado de 4.75 mm.

como desarrollo de colapsos de material en la corona y grandes conductos a través del corazón impermeable.

iniciar la erosión interna del suelo. Las características de erosión se describen mediante el Índice de Velocidad de Erosión ( $I$ ), definido como:

### Investigaciones recientes

Existen varias instituciones académicas y gubernamentales en el ámbito internacional que han estado trabajando en proyectos relacionados directamente con el diseño óptimo de filtros mediante pruebas de laboratorio. Una de estas instituciones es la Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de New South Wales, en Sydney, Australia (Wan *et al.*, 2002), donde se han propuesto las pruebas denominadas *Slot erosion tests* (SET=prueba de erosión en una ranura) y la *Hole erosion test* (HET=prueba de erosión en un orificio).

En la prueba SET se hace una ranura rectangular de 2.2 mm de espesor, 10 mm de ancho y 1 m de longitud, sobre uno de los lados de una muestra no saturada de suelo compactada dentro de una caja de aluminio de 0.10 m de ancho, por 0.15 m de altura y 1 m de longitud. La ranura previamente realizada está en contacto con una cubierta transparente de *perspex*, a fin de que pueda ser observada durante la prueba (ilustración 7). Se hace circular agua a través de la ranura, con la idea de iniciar la erosión a lo largo de la misma; la variación de la sección transversal de la ranura se va midiendo periódicamente. La prueba HET es muy similar a la anterior, sólo que en vez de formar una ranura rectangular, se hace un hoyo o agujero circular de 6 mm de  $\varnothing$  (ver ilustración 8). En ambas pruebas se trata de estudiar la velocidad de erosión y los esfuerzos cortantes críticos capaces de

$$I = -\log(Ce) \quad (5)$$

Donde  $Ce$  es una constante de proporcionalidad denominada coeficiente de erosión del suelo, misma que relaciona la velocidad de erosión debida al flujo del agua con el esfuerzo cortante crítico. Los valores de  $I$  varían entre 0.1 y 6, lo cual indica que la velocidad de erosión entre dos suelos (que se estudian) puede ser tan grande como  $10^6$ . Entre más bajo sea este índice, implica que el suelo es más susceptible a erosionarse.

De acuerdo con los autores que proponen estas pruebas, los resultados de ambas son muy similares; sin embargo, la prueba HET resulta más económica y rápida que la SET. Proponen, por tanto, utilizar las pruebas HET para cuantificar la velocidad de erosión a la que es susceptible un suelo, y determinar en él el esfuerzo cortante crítico capaz de iniciar el proceso de tubificación. Dicho en otras palabras, como alternativa a las pruebas NEF de laboratorio recomendadas por Sherard y Dunnigan (1989), mediante las pruebas HET es posible determinar más fácilmente las características de erosión que tiene un suelo base y con ello evaluar la susceptibilidad de falla por tubificación de la cortina.

Recientemente (Flores y Gaytán, 2003; Gaytán, 2004), en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se han estado realizando varias pruebas de laboratorio tendientes a definir las características de erosión que un suelo puede tener, así como la determinación del filtro más adecuado que cumpla con el criterio de Sherard y

Ilustración 7. Diagrama esquemático de la prueba de erosión de ranura (prueba SET).

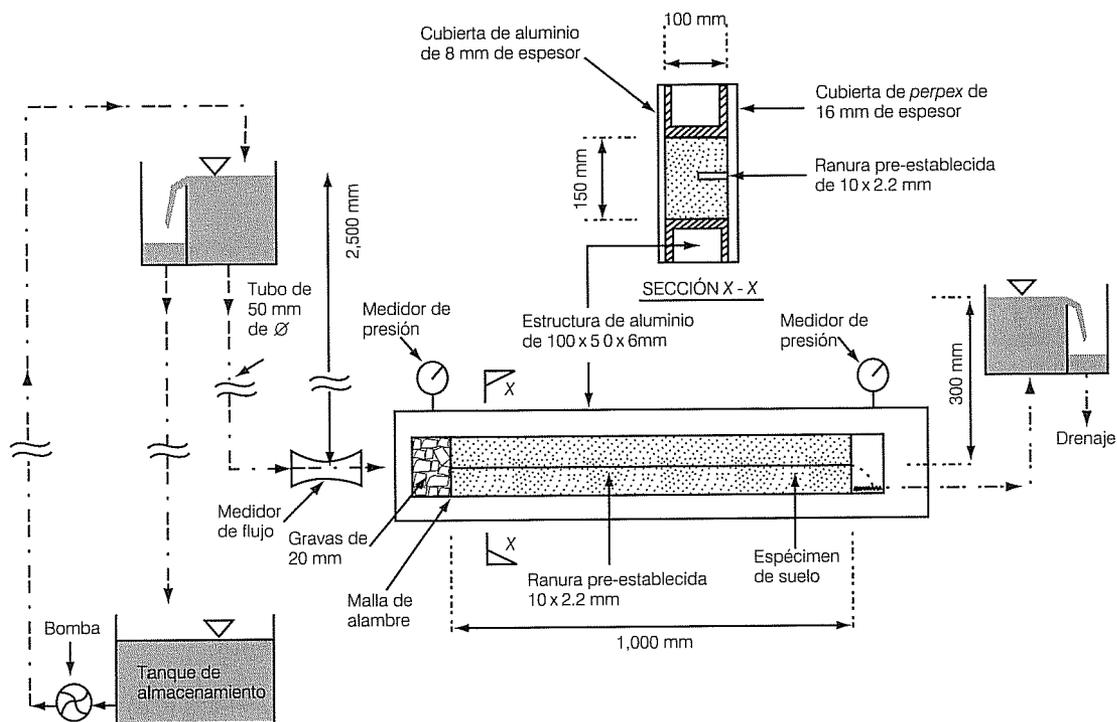
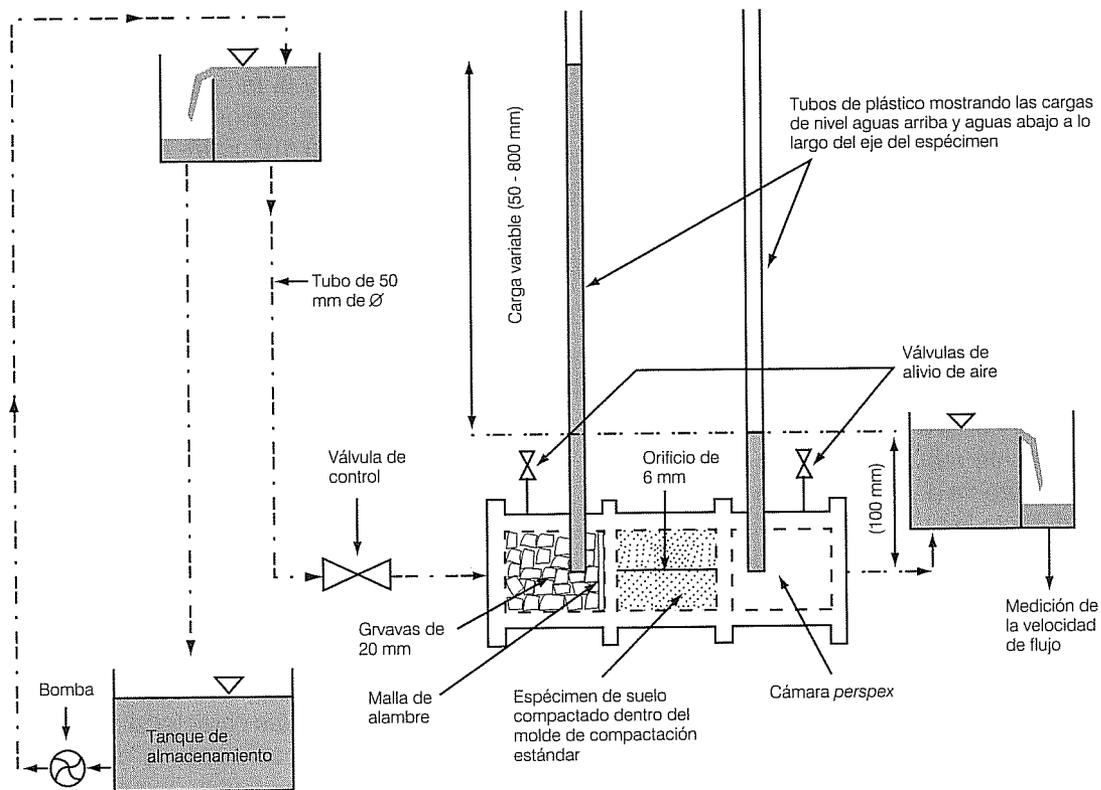


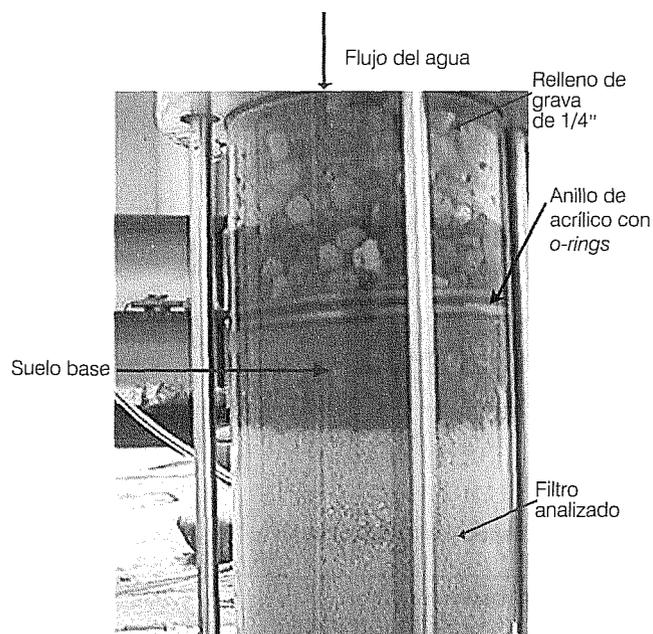
Ilustración 8. Diagrama esquemático de la prueba de erosión del orificio (prueba HET).



Cuadro 8. Propiedades índice de las muestras de suelo.

Prueba	Puente de Ixtla		Presa la escondida				Cautla	
	CL	CH	1	2	3	4	PCA-3-9	PCA-1-4
Clasif. del suelo (SUCS)	CL	CH	CH	CH	CH	CH	MH	MH
Límite líquido	31	51	51	53	52	52	59	76
Límite plástico	18	17	24	21	14	14	43	37
Índice plástico	13	34	27	32	38	38	16	39
Lím. de contracción volum	4	16	13	15	13	13	29	19
Densidad	2.56	2.44	2.47	2.41	2.37	2.37	2.39	2.40
% de finos	58	98	94	96	95	95	80	87
% de arenas	42	2	6	4	5	5	20	13

Ilustración 9. Fotografía de una prueba de filtro.



Dunnigan. A continuación se presenta una síntesis de los experimentos efectuados, junto con los resultados obtenidos.

Primeramente se analizaron varias muestras de suelo por medio de las propiedades índice (cuadro 8) para verificar su clasificación y su granulometría. Las pruebas de filtro se realizaron con las modificaciones siguientes, respecto a la prueba de Sherard y Dunnigan (1984b): a) caso de un anillo de acrílico con o-rings, en vez de la arcilla especial señalada por Sherard y Dunnigan, a fin de no permitir el paso del agua entre el perímetro del suelo base y el cilindro del equipo (ver ilustración 9); b) la compactación del espécimen se realizó en tres capas, sin utilizar la mesa vibratoria recomendada

por el protocolo; la primer capa, que es la del filtro, se efectuó con una tamizadora vibratoria; la segunda capa, perteneciente al suelo base, se compactó al menos en 95% del proctor estándar, utilizando el contenido de humedad óptimo (a fin de seguir las recomendaciones de Bertram, 1940), y la tercer capa, relacionada con la grava de 1/4", se colocó a volteo. Los parámetros que se cuidaron durante la prueba fueron los siguientes: peso volumétrico, presión del depósito de agua (4 kg/cm<sup>2</sup>) y temperatura ambiente (25±0.5 °C). Además, se observó que no se presentaron fugas de aguas en el equipo durante el ensayo y que no pasara agua entre el perímetro del suelo base y el cilindro. Se pueden ver más detalles en Gaytán, 2004.

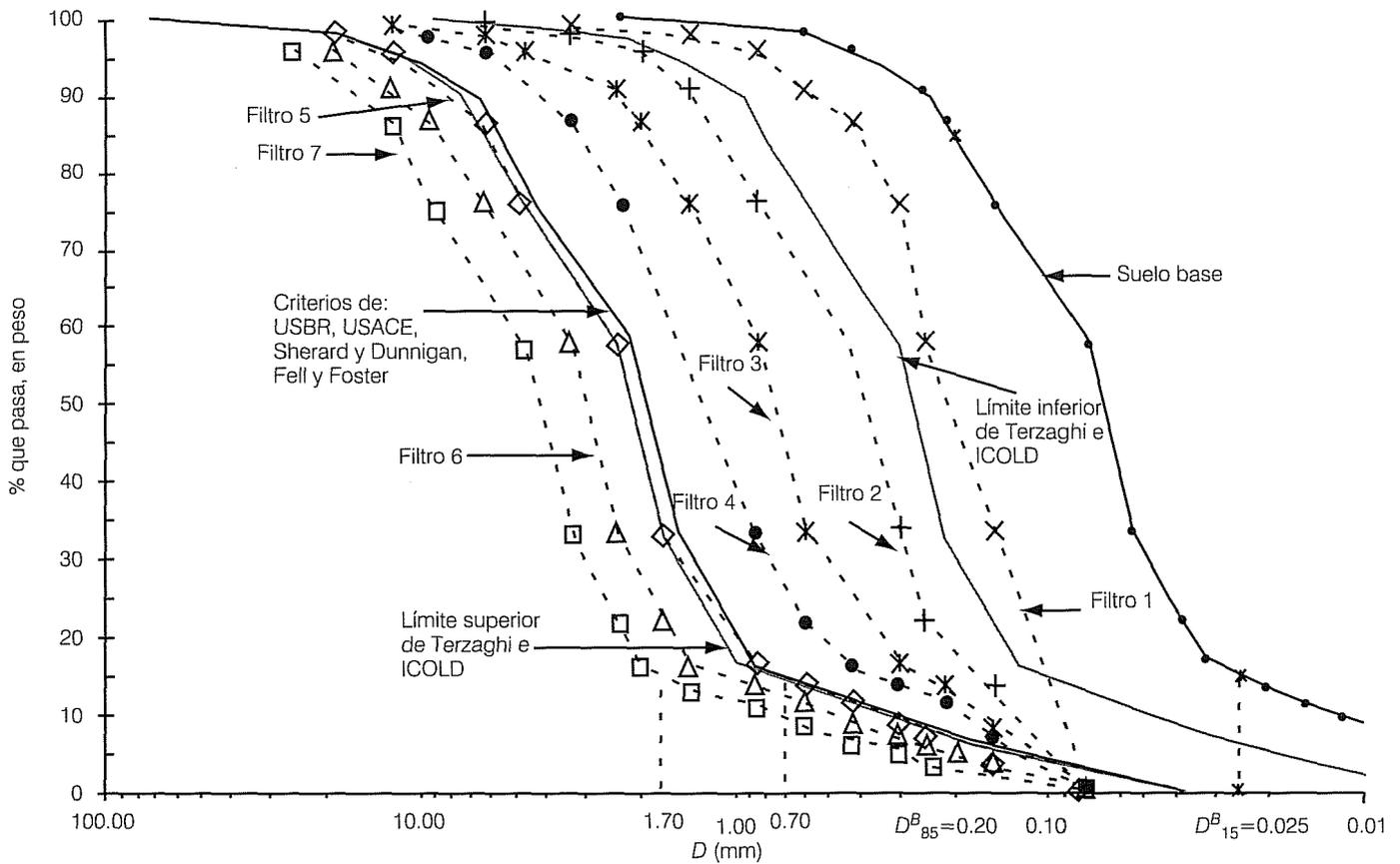
El suelo base experimental "Arcilla arenosa (CL con respecto al SUCS), de color café claro", pertenece al grupo 2A de acuerdo con el cuadro 6, ya que contiene 58% de finos, es de origen aluvial y su curva granulométrica se muestra en la ilustración 10. Se utilizó este suelo porque se disponía de una mayor muestra.

En la ilustración 10 se pueden observar distintos filtros para la muestra de suelo base, los cuales se comparan con los criterios de Terzaghi, Sherard y Dunnigan, 1989; Foster y Fell, 2001; ICOLD, 1994; USACE, 2000 y USBR, 2000. En el cuadro 9 se puede ver el gasto hidráulico y el coeficiente de uniformidad de estos filtros.

Analizando los resultados de estas pruebas (cuadro 9 e ilustración 10) se puede observar lo siguiente:

- Todos los filtros considerados presentaron experimentalmente un comportamiento satisfactorio desde el punto de vista de erosión (el agua resultante de la prueba del filtro salió completamente limpia); sin embargo, en el filtro 1 se observó un gasto significativamente menor al resto de los otros filtros. Por otro lado, todas las curvas granulométricas de los filtros terminan en un solo punto (0.074 mm), ya que por recomendación de los criterios debe evitarse el contenido de finos.

**Ilustración 10. Análisis experimental de filtros eficientes para una muestra de suelo siguiendo el criterio de Sherard y Dunnigan (Sherard y Dunnigan, 1989), comparando los resultados con los criterios de Terzaghi (ICOLD, 1994; USBR, 2000; USACE, 2000; Foster y Fell, 2001).**



**Cuadro 9. Parámetros y análisis de los filtros experimentales con los criterios, con respecto a la ilustración 10.**

Filtro	$C_u$ ( $D_{60}/D_{10}$ )	$Q$ ( $cm^3/min$ )	Criterios de filtros					
			Terzaghi	Sherard y Dunnigan	ICOLD	USBR	USACE	Foster y Fell
1	2.7	30	X	✓	X	✓	✓	✓
2	3.6	105	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	5.3	750	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	8.4	800	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	7.3	900	✓	X	✓	X	X	X
6	6.8	900	X	X	X	X	X	X
7	6.9	900	X	X	X	X	X	X

✓ Filtro que se encuentra dentro del criterio.

X Filtro que no está dentro del criterio, pero que experimentalmente desarrolló un buen comportamiento.

- El filtro 1 no cumple con el criterio de Terzaghi e ICOLD referente al límite inferior de dicho criterio, mismo que se refiere al aspecto hidráulico para que la permeabilidad sea al menos veinte veces mayor que la del suelo base.
- Se pudo observar que la granulometría de los filtros no es proporcional con el gasto hidráulico resultante de la prueba, ya que en los filtros del 5 al 7 se tiene el mismo gasto hidráulico y diferente granulometría.

- Para este suelo base en particular, se puede observar que el límite superior de Terzaghi es casi el mismo con el límite de Sherard y Dunnigan, 1989; Foster y Fell, 2001; USBR, 2000, y USACE, 2000.
- Los filtros 5, 6 y 7 corresponden al rango experimental  $D_{15}^F$ , en el cual no se observó erosión de acuerdo con las pruebas de laboratorio efectuadas por Foster y Fell (ver cuadro 6), y los límites frontera determinados por Sherard y Dunnigan; sin embargo, dichos filtros se salen del límite  $D_{15}^F$  recomendado según el criterio de estos autores, el cual considera un margen de seguridad.
- Los filtros 2, 3 y 4 cumplen con todos los criterios aquí considerados. Sin embargo, dentro de estos tres filtros, el 4 es el filtro quizás más recomendable para el diseño y construcción de una presa con este tipo de material base (2A), ya que dicho filtro tuvo un gasto hidráulico alto, y cumple perfectamente las partes geométrica y granulométrica de los criterios tradicionales, amén de que la segregación de las partículas resulta mínima.

### Dimensionamiento de un filtro dren

El espesor o ancho de un filtro depende fundamentalmente de tres factores. Por un lado, se debe cumplir con la capacidad hidráulica para que desaloje eficientemente las cantidades de agua que se estima le pueden llegar. En segundo lugar, se debe considerar el equipo disponible para colocar y compactar adecuadamente el material de filtro. Y, por último, se debe tomar en cuenta un costo balanceado que considere los costos del material del filtro y los del procedimiento constructivo en el sitio, de manera que este último cumpla las especificaciones del proyecto. Sin embargo, además de estos tres factores, el espesor del filtro debe ser conservador, de manera que tenga un factor de seguridad que tome en cuenta irregularidades geotécnicas o imprevistos de construcción.

El primero de estos factores está determinado por la transmisibilidad  $T$ , definida por el producto del coeficiente de permeabilidad  $k$ , por el espesor  $t$  del filtro perpendicular al flujo. El espesor, por tanto, se obtiene de la siguiente relación:

$$t = \frac{T}{k} = \frac{Q}{ki} \quad (6)$$

Donde:

$Q$  = gasto de descarga en el filtro.

$i$  = gradiente en el filtro dren.

Considerando el caso de un filtro dren vertical o "chimenea", como el mostrado en la ilustración 1, que protege al corazón impermeable, el valor del gradiente hidráulico ( $i_1$ ) es prácticamente igual a 1.0; el ancho  $t_1$  del filtro estará dado por la relación  $Q_1/k_1$ , donde  $Q_1$  es el gasto que llega a ese filtro a través del corazón impermeable y  $k_1$ , el coeficiente de permeabilidad de ese filtro. Sin embargo, de acuerdo con el USBR (2000), desde el punto de vista del uso del equipo de construcción más pequeño, el ancho mínimo en este tipo de filtros-drenes debiera ser de entre 2.4 a 3.0 m; si por consideraciones económicas fuera necesario restringir más este ancho, Cedergren (1994) recomienda un valor mínimo de 1.0 m. Debe tomarse en cuenta que los filtros con anchos o espesores estrechos requieren procedimientos especiales de colocación de los materiales y una inspección muy estricta durante la construcción.

En el caso de un filtro-dren horizontal (ver ilustración 1), el valor del gradiente hidráulico ( $i_2$ ) es mucho menor (del orden de 2 a 3%) que la de un dren vertical, de suerte que la transmisibilidad horizontal ( $Th$ ) debe ser mucho mayor que la vertical ( $Tv$ ). Si tomamos en cuenta que el gasto  $Q_2$  que recibe el dren horizontal es generalmente mayor que el que recibe el dren vertical ( $Q_1$ ), y que el gradiente permisible ( $i_2$ ) es también muy pequeño, el valor de  $Th$  con frecuencia resulta ser de 50 a 100 veces  $Tv$ ; es decir:

$$\frac{Q_2}{i_2} = t_2 k_2 \approx 50 a 100 (t_1 k_1) \quad (7)$$

donde  $t_2$  y  $k_2$  son, respectivamente, el espesor y el coeficiente de permeabilidad del filtro-dren horizontal. Es importante señalar que este filtro dren debe satisfacer, además de los requisitos de permeabilidad, los criterios de filtro en relación con los materiales del terraplén y la cimentación que están en contacto con él. El espesor mínimo que recomienda el USBR en este tipo de dren es de 30 cm (un pie).

### Requerimientos constructivos

Dependiendo de los volúmenes de material que se requieren para los filtros, dicho material se puede obtener de un banco natural relativamente cercano al sitio de la cortina o de una planta trituradora; en ocasiones resulta conveniente utilizar una combinación de dos o más fuentes. En cualquiera de los casos, se recomienda tener un volumen disponible de material de filtro que duplique al menos el volumen de proyecto, y realizar las pruebas necesarias de laboratorio para asegurar que la

distribución granulométrica del material, una vez que se ha colocado en el sitio, cumple con las especificaciones de proyecto.

Para evitar la contaminación por exceso de finos, el USBR (2000) recomienda: a) que la zona de filtros se mantenga por arriba de las otras zonas que rodean al filtro y colocar el material de manera que el agua superficial se mantenga alejada de la zona del filtro; b) controlar el tráfico de vehículos, de manera que durante su cruce o paso por la zona de filtros, las llantas no depositen finos indeseables para el correcto funcionamiento de los filtros; c) verificar que la durabilidad de los materiales sea tal, que durante el proceso de colocación y compactación no se rompan las partículas del material de filtro.

A fin de satisfacer el requisito de que el contenido de finos en el filtro después de la compactación se mantenga menor al 5%, es necesario que el sitio de almacenamiento del material dicho contenido no sea mayor de 2 a 3%.

En lo que se refiere a compactación, ésta debe ser suficiente para evitar problemas de licuación o consolidación, y producir la resistencia al esfuerzo cortante necesaria para asegurar la estabilidad de la cortina; para el logro de estos requisitos, el valor mínimo de la densidad relativa debe ser no menor al 70%. Sin embargo, la compactación no debe excederse, ya que ello puede llevar a disminuir los valores de la permeabilidad; en este sentido, se recomienda efectuar periódicamente pruebas de campo y/o laboratorio que permitan verificar que la permeabilidad del filtro en el sitio cumple con las especificaciones del proyecto.

La parte más importante que debe cuidarse durante el proceso de construcción de un filtro es el control de la segregación, la cual ocurre siempre que el material del filtro se deposita a volteo, principalmente cuando se hace desde una altura considerable. Para tener un adecuado control de dicha segregación, el USBR (2000) recomienda: a) especificar en el proyecto una granulometría uniforme y con tamaños máximos de partículas acotados; b) especificar claramente el o los procedimientos de construcción para evitar la segregación; c) utilizar mecanismos de colocación (bandas transportadoras, cajas distribuidoras de material, colocación manual, etcétera) que ayuden a prevenir la segregación; d) limitar la altura de caída del material.

## Conclusiones

- El criterio de Sherard y Dunnigan fue el primero en hacer una clasificación de filtros no erosionables a partir de pruebas de laboratorio, y sus resultados han sido base de partida para todos los criterios posteriores a su fecha de publicación (1989).

- El criterio de Terzaghi es aparentemente el único que explícitamente toma en cuenta la permeabilidad de los filtros a través de su límite inferior. Por otro lado, el criterio de Foster y Fell es muy semejante al de Sherard y Dunnigan, a pesar de estar definidos a partir de pruebas diferentes.
- De acuerdo con lo que se puede observar en el caso particular analizado de este trabajo, el límite no erosionable de Terzaghi no es tan conservador como se dice, ya que tanto el criterio propuesto por Sherard y Dunnigan como el de Foster y Fell, son similares al límite (superior) de Terzaghi. Los criterios de USBR y de USACE se basan fundamentalmente en los resultados de Sherard y Dunnigan.
- Los filtros en presas de tierra y enrocamiento deben diseñarse expresamente en función de las características del material que constituye el corazón impermeable de cada presa; para ello deben realizarse pruebas de laboratorio, a fin de determinar las características de un filtro eficiente, siguiendo algún criterio.
- Es indispensable tener un control estricto al momento de instalar y compactar el material del filtro en el sitio, a fin de evitar la segregación y la contaminación de finos y, en general, asegurarse de que las especificaciones relacionadas con la granulometría y las propiedades de los materiales que constituyen el filtro se cumplan cabalmente.
- Los resultados aquí mostrados se refieren exclusivamente al tipo de suelo (2A) analizado; para otro tipo de suelo se recomienda efectuar un procedimiento semejante al descrito en este trabajo. Hace falta, por tanto, continuar esta investigación para otras muestras de suelo base.
- Se pudo observar con la fase experimental, que los criterios comparados con los resultados de las pruebas se encuentran del lado conservador, ya que algunos filtros con tamaños  $D_{15}$  mayores al mínimo especificado no permitieron erosión alguna del material base.

## Agradecimientos

Se agradece a los revisores de este artículo sus comentarios y sugerencias, que enriquecen la presentación y el contenido del mismo. Igualmente a las autoridades del IMTA por permitir utilizar el laboratorio de mecánica de suelos donde se llevó a cabo la fase experimental; en particular a los doctores Nahún García Villanueva y Ariosto Aguilar Chávez, así como al maestro en ingeniería Isaac Bonola Alonso, por su apoyo y sugerencias en la etapa experimental. Finalmente, un agradecimiento para Antonio Requejo del Blanco por su aportación a la redacción técnica y a Luisa Guadalupe Ramírez por su apoyo en la elaboración del manuscrito.

Recibido: 12/02/2004  
Aprobado: 02/06/2004

## Referencias

- BERTRAM, G.E. An experimental investigation of protective filters. *Harvard soils mechanics series*. Núm. 7. Harvard University, 1940.
- CASAGRANDE, A. *Seepage through dams*. Contribution to Soil Mechanics, Boston Society of Civil Engineers, 1937, pp. 295-336.
- CASAGRANDE, A. *Notas del curso Engineering 262*. Dictado en la Universidad de Harvard, 1967.
- CEDERGREN, H. Seepage control in earth dams. *Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume*. New York: John Wiley, 1973, pp. 21-45.
- CEDERGREN, H. *Seepage, drainage and flow nets*. Tercera edición. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989, pp. 151-200.
- CEDERGREN, H. Appendix B-filtering and transmissibility needs of drains in dams and other water-impounding structures. *Desing Standars*. Núm. 13. *Embankment Dams*. Chapter 5- Protective Filters. USBR, 1994.
- FELL, R., WAN, C.H. y FOSTER, M. *Progress report on methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. Sydney, Australia: The University of New South Wales, 2003.
- FLORES, R., ALBA, F. y LI, X. Efecto del flujo de agua en la estabilidad de taludes. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVIII, núm. 2, abril-junio, 2003, pp. 35-52.
- FLORES, R. y GAYTÁN, I. *Granular filter analysis review*. Soil and Rock America 2003. 12<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2003, pp. 1523-1528.
- FOSTER, M.A. y FELL, R. *A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping, using event tree methods*. UNICIV rep. no. R-377. Sidney, Australia: School of Civil and Environmental Engineering University of New South Wales, 1999.
- FOSTER, M.A. y FELL, R. "Use of event trees to estimate the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping. *Proc. 20<sup>th</sup> Int. Congress on Large Dams*. París: Beijing International Commission on Large Dams (ICOLD). Question 76. Vol. I, 2000, pp. 237-260.
- FOSTER, M.A. y FELL, R. Assessing embankment dam filters that do not satisfy desing criteria. *J. geotech. geoenviron. eng.* Vol. 127, núm. 5, 2001, pp. 398-407.
- GAYTÁN, I. *Análisis experimental de filtros en presas de tierra y enrocamiento*. Tesis de maestría. DEPMI-UNAM, 2004 (en proceso).
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Use of granular filters and drains in embankment dams. Bulletin 95*. París, 1994.
- MARSAL, R. y RESÉNDIZ, D. *Presas de tierra y enrocamiento*. México, D.F.: Limusa, 1975.
- PECK, R. *Failure of teton dam, Idaho falls, Idaho*. Report to U.S. Dept. of Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam. Publication # 162. Supt. Documents, U.S. Gout. Printing off 219, 1976.
- SHERARD, J.L., WOODWARD, R.J., GIZIENSKI, S.F. y CLEVENGER, W.A. *Earth and earth-rock dams*. Cap. 2. New York: John Wiley, 1967.
- SHERARD, J.L. y DUNNIGAN, L.P. Filtres for silts and clays. *Journal of geotechnical engineering, ASCE*. Vol. 110, núm. 6, 1984b, pp. 701-718.
- SHERARD, J.L. y DUNNIGAN, L.P. Critical filters for impervious soils. *Journal of geotechnical engineering, ASCE*. Vol. 115, núm. 7, 1989, pp. 927-947.
- SILVA, G. *Efectos de salmuera y temperatura en la permeabilidad de suelos arcillosos*. Tesis doctoral en proceso. DEPMI, UNAM, 2003.
- STIDWORTHY, E., DUNCAN, J.M., BRANDON, T.L. y PARK, Y. *Filter criteria workbook documentation*. Report of a study performed by the Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, New Jersey, 2002.
- TERZAGHI, K. *Unpublished report on Bou-Hanifia dam, North Africa*. 1929. Citado por Bertram (1940).
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *Appendix B - filter design*. EM 1110-2-2300, julio, 1994.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *Appendix D - filter design*. EM 1110-2-1913, abril, 2000.
- U.S. BUREAU OF RECLAMATION (USBR). *Protective filters*. Design standards núm. 13. Embankment dams. Chap. 5, Denver, 2000.
- WAN, C.F., FELL, R. y FOSTER, M.A. *Experimental investigation of the rate of piping erosion of soils in embankment dams*. Sydney, Australia: ANCOLD Conference on Dams, 2002.

**Abstract**

*FLORES-BERRONES, R. & GAYTÁN-COLIN, I. New investigations on filter design for earth and rockfill dams. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XX, no. 2, April-June, 2005, pp. 79-94.*

*A review on the design and construction of filters for earth and rockfill dams is presented . A description of the results from new investigations on this subject is also presented, together with the most important outcomes from an experimental research conducted at the Mexican Institute of Water Technology. Taking into account the state of knowledge on this subject, several recommendations are given to verify the safety of dams that were constructed under inadequate filter design criteria, or where construction control was not properly supervised. Recommendations for the design and construction of filters in new earth- and rockfill dams are also given.*

**Keywords:** *pipng, dam safety, filter design, earth- and rockfill dams, seepage.*

**Dirección institucional de los autores:**

*Dr. Raúl Flores-Berrones  
Dr. Ivar Gaytán-Colin*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,  
Paseo Cuauhnáhuac 8532,  
62450 Progreso, Jiutepec, Morelos, México,  
teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 834,  
rflores@tlaloc.imta.mx