

Ms. Sc. Ing. Jorge Briones G.

RESISTENCIA A LA FALLA POR FILTRACIÓN

EROSIÓN INTERNA POR CONTACTO EN PRESAS DE TIERRA



JUNIO 2022

LIMA-PERU

Ms. Sc. Ing. Jorge Briones G.

**RESISTENCIA LA FALLA POR
FILTRACIÓN
EROSIÓN INTERNA POR CONTACTO
EN PRESAS DE TIERRA**

JUNIO 2022

LIMA-PERU

PRESENTACIÓN

En el año 1994 salió a la luz mi primera publicación "PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO-Resistencia a la falla por filtración", fue todo un esfuerzo de investigación y acopio sobre un problema importante, que debe ser tratado en el análisis de la seguridad de todo tipo de presa, especialmente en presas de materiales de préstamo (presa de tierra, de enrocado), el tema: Erosión Interna de suelos.

Equivocadamente a nivel de Hispanoamérica, y en el Perú en particular, respecto a la seguridad Estructural de la presa, se piensa que satisfacer con los Factores de Seguridad (FS) normados para la Estabilidad de Taludes, o limitación de los esfuerzos de tracción en el cálculo de Tensión-Deformación, o el mismo cálculo Dinámico, se está garantizando la vida y seguridad de la presa, lo cual no es correcto.

De acuerdo a las investigaciones del ICOLD (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS), la causa de falla de las presas de materiales de préstamo se distribuye de la siguiente manera: el 46% tiene su origen en el vertimiento de agua sobre la presa (OVERTOPPING), debido a un diseño inadecuado del aliviadero para la descarga de la Avenida Máxima; otro 46% lo representa la

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

Erosión Interna del cuerpo o cimentación de la Presa (Piping), y el 8% restante lo constituyen la inestabilidad estática o dinámica de los taludes.

Lo mencionado nos enseña que, hay una parte del análisis sobre la seguridad de la presa generalmente no realizada referida a la Estabilidad interna de los suelos que conforman el cuerpo o cimentación de la presa, que podría tener lugar como consecuencia del lavado de las fracciones finas por efecto del flujo filtrante.

Esta breve publicación desea llamar la atención a los profesionales dedicados al diseño de presas, sobre la necesidad de realizar los cálculos relacionadas a la EROSIÓN INTERNA. En esta oportunidad solamente se expone el tema de la EROSIÓN POR CONTACTO, dejando en deuda otras publicaciones, sobre las diferentes formas del fenómeno de Erosión Interna.

Agradeceré sus comentarios sobre el particular

Ms. Sc. Ing. Jorge Briones Gutiérrez

jebriones@hotmail.com

jebriones45@gmail.com

CONTENIDO

1.0	SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE LAS PRESAS	4
2.0	CONDICIONES PARA LA EROSIÓN INTERNA	8
3.0	FENÓMENO DE EROSIÓN POR CONTACTO	10
4.0	LUGARES POSIBLES DE EROSIÓN POR CONTACTO	11
5.0	CONDICIONES EN ANÁLISIS DE LA EROSIÓN POR CONTACTO	14
6.0	MODELOS PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN GEOMÉTRICA	16
6.1	Método de Kenney y Lau	17
6.2	Modelo soviético	20
6.2.1	Criterio para determinar la Erosión Interna de un suelo	20
6.2.2	Determinación del diámetro de Cálculo de los intersticios en suelos no cohesivos.....	22
7.0	MODELO PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN HIDRÁULICA O HIDRODINÁMICA PARA LA EROSIÓN POR CONTACTO.	27
7.1	Modelo Soviético.....	27
7.1.1	Suelo fracciones finas no cohesivos-suelo fracciones gruesas	29
7.1.2	Suelo Cohesivo -suelo fracciones gruesas	35
8.0	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
9.0	BIBLIOGRAFÍA	40

1.0 SEGURIDAD ESTRUCTURAL DE LAS PRESAS

En las Normas y reglamentos sobre Seguridad Estructural de las presas en Perú y otros países, exigen los siguientes Cálculos:

- A) Cálculo de Filtración
- B) Cálculo de la Estabilidad de Taludes
- C) Cálculo Tensión Deformación
- D) Cálculo Dinámico

Los tres últimos cálculos a menudo se realizan en forma adecuada, facilitado por la existencia de Software (programas), que flexibilizan los cálculos y además los datos de ingreso son posibles obtenerlos con los estudios correspondientes, tanto en campo como en el laboratorio.

Sin embargo, el Cálculo de Filtración, aún no es tratado en la dimensión de su importancia, porque se piensa que este cálculo en una presa simplemente se reduce a la obtención de la Red de Flujo y sus parámetros: Caudal y velocidad de filtración, así como, la magnitud de los Gradientes Hidráulicos.

En mi publicación del año 1994 introduje un concepto: RESISTENCIA A LA FALLA POR FILTRACIÓN, o ESTABILIDAD A LA FILTRACIÓN. Las denominaciones anteriores incluyen a la EROSIÓN INTERNA DE LOS SUELOS y otros fenómenos

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

originados por la filtración. La propia Estabilidad a la Filtración, obliga a resolver esa relación directa entre las magnitudes de la Gradiente Hidráulica, con la Granulometría de los suelos, que están afectas a la filtración.

Algunas presas de acumulación de agua y relave han colapsado, sin embargo, se ha atribuido a la falla del talud, sin considerar si, previamente probablemente tuvo lugar una Erosión Interna del material del cuerpo o cimentación de la presa.

La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), reconoce 04 formas de fallas por filtración en presas de Materiales de Préstamo.

- Fugas concentradas (Concentrated Leaks)
- Erosión regresiva (Backward erosion)
- Erosión por contacto (Contact erosion)
- Sufusión (Suffusion)

Los nombres de los científicos que iniciaron el estudio asociados al fenómeno de erosión interna se puede mencionar a: Bligh (1910), Lane (1934), Karl Terzaghi (1939), y posteriormente otros, sin embargo, se puede afirmar que las investigaciones bastantes más detalladas, se intensificaron a partir año 2000, elaborando una serie de metodologías para identificar los diferentes tipos de fallas por filtración, que permiten evaluar su presencia, magnitud y efectos sobre todo en las Presas de Materiales de Préstamo.

Es importante resaltar, que el estudio del fenómeno de la Erosión Interna, también fue una vieja preocupación en Rusia, y es necesario señalar, que a raíz de la implementación del programa de la Comisión Gubernamental para la Electrificación de Rusia (1920-30), posteriormente luego de la Segunda Guerra Mundial (1940-60) ligado al desarrollo de la Electrificación y agricultura, y desde 1970-1980, relacionado con la construcción de Presas altas, suman la historia de las investigaciones respecto a la Erosión Interna, con gran éxito, pero no divulgados por el mundo occidental.

En este artículo solamente estaremos tratando el tema referido a LA EROSIÓN POR CONTACTO. Se muestra una propuesta de cálculo, queda al lector seguir investigando sobre este fenómeno y seguro encontrará otras metodologías, que son la consecuencia de las investigaciones individuales en cada país y en cada laboratorio.

El análisis a la Erosión interna debe realizarse en profundidad teniendo en cuenta la altura de la presa, cuanto más alta o su categorización por el probable riesgo de falla, entonces los cálculos de Resistencia a la Filtración deben ser más detallados, en comparación a una presa de alturas pequeñas o categoría por ejemplo C, que no implica afectaciones o daño alguno ante una probable falla.

Es importante señalar, que solamente es posible realizar los cálculos de Erosión Interna, si se cuenta con la información completa por ejemplo de la Curva

Granulométrica de los suelos, Relación de vacíos o porosidad, densidad específica, Coeficiente de Permeabilidad y otros. La curva granulométrica debe ser completa, es decir, su segmento obtenido mediante el tamizado (hasta la malla #200) y la otra parte que se obtiene por suspensión, este último segmento es importante, porque representan las fracciones más sensibles de los suelos a ser transportados por el flujo filtrante, además porque determinan la magnitud del coeficiente de permeabilidad de los suelos. Otros parámetros también son importantes a señalar más adelante

2.0 CONDICIONES PARA LA EROSIÓN INTERNA

Es necesario señalar que en el problema del análisis de filtración o la seguridad a la falla por filtración, existen dos niveles de análisis: Análisis Global y Análisis local.

El análisis **Global** por ejemplo está enfocado desde la propuesta de Bligh y corregida por Lane. Estas metodologías limitan su análisis de seguridad de la estructura a un parámetro medio de toda la cimentación o todo el cuerpo, sin considerar que el flujo filtrante en el área por ejemplo de la cimentación, varía sus parámetros como son la velocidad y Gradiente Hidráulico.

El análisis **Local**, estudia las zonas en donde se incrementan los valores de las velocidades de filtración o gradientes Hidráulicos. En esta publicación solamente presentamos el análisis Local, respecto a la Erosión por contacto.

En forma general, para pronosticar la existencia de una Erosión Interna, en el cuerpo o cimentación de la presa, es necesario realizara los siguientes análisis:

- **CONDICIÓN GEOMÉTRICA:** Significa que los vacíos o poros que forman las fracciones gruesas del suelo sean lo suficientemente grandes como para permitir el paso de partículas finas, arrastradas por el flujo filtrante.

- **CONDICIÓN HIDROMECÁNICA O HIDRÁULICA:** El Gradiente Hidráulica o la velocidad del flujo debe ser suficiente para arrastrar las partículas finas y transportarlas a través de los poros que forman las fracciones gruesas.

La primera condición es puramente geométrica, independiente de las condiciones o de los parámetros de filtración. Para la Segunda condición, es necesario realizar los cálculos hidráulicos de filtración, y determinar sus parámetros hidráulicos: Velocidad, Gradiente, Caudal de filtración, Red de flujo, y como afecta a la estructura del suelo.

La condición Geométrica, se analiza a partir del conocimiento de la totalidad de la curva granulométrica representativo del (los) materiales que se analizan.

La erosión interna no solamente se presenta en el cuerpo de la presa o cimentación no rocosa, también es posible que se presente en las fracturas de las cimentaciones rocosas, que se encuentran rellenas de material granular o material cohesivo.

3.0 FENÓMENO DE EROSIÓN POR CONTACTO

La erosión por contacto ocurre cuando un suelo grueso como la grava está en contacto con un suelo fino (arenoso), y se tiene un flujo paralelo en el contacto de los suelos. Por ejemplo, el flujo a través del aluvión de grava en los cimientos de una presa o un dique puede erosionar la base de una capa de limo suprayacente, o la erosión de las capas más finas del material en un núcleo de la presa, puede ocurrir en una capa de grava gruesa formada por segregación durante la construcción como se muestra en la Figura 3.1.

En la Figura 3.1, se muestran dos capas, una de materiales finos y otra de materiales gruesos. Se observa el vector de velocidad del flujo PARALELO, que también puede ser expresado por la Gradiente hidráulico, el material de la capa de material fino es “jalado” por el flujo hacia la capa de material grueso.

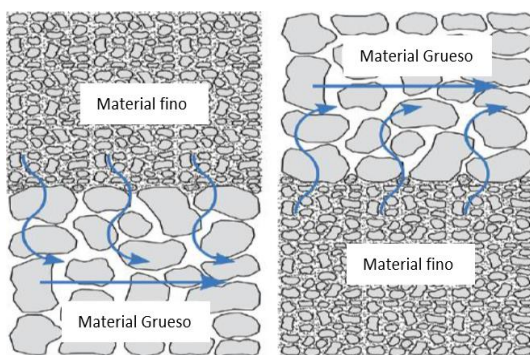


Figura 3.1 Fenómeno de Erosión por contacto.

4.0 LUGARES POSIBLES DE EROSIÓN POR CONTACTO

En la Figura 4.1, se muestran los lugares más comunes en los cuales se puede presentar la Erosión por contacto. En función de la distribución del material del cuerpo de la Presa pueden presentarse en otros lugares. El diseñador de Presas está en la obligación de tener la experticia suficiente para ubicarlos.

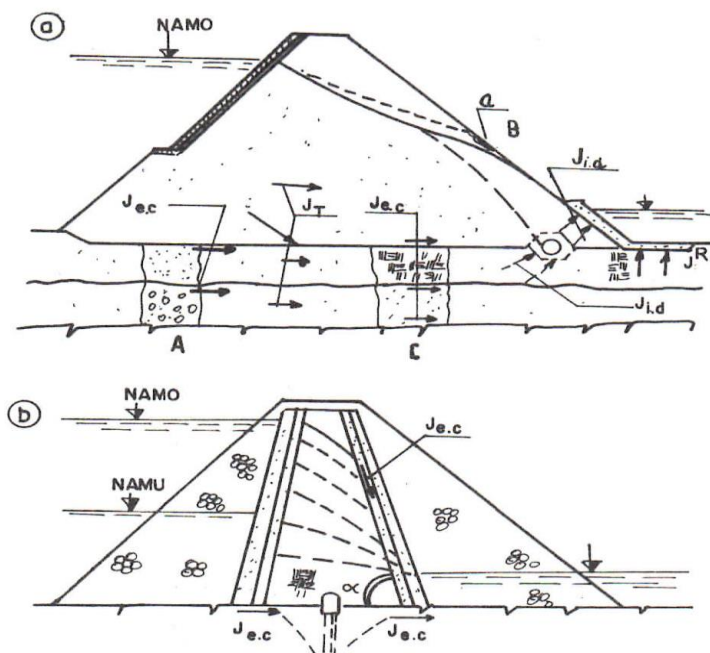


Figura 4.1. Lugares de probable Erosión por Contacto

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

En la Figura 4.2 en la interfaz del núcleo y la cimentación, es posible la presencia de la Erosión por contacto, debido al flujo en la capa del suelo de grano grueso o por erosión debido al flujo de las fisuras de la roca (caso de cimentación rocosa).

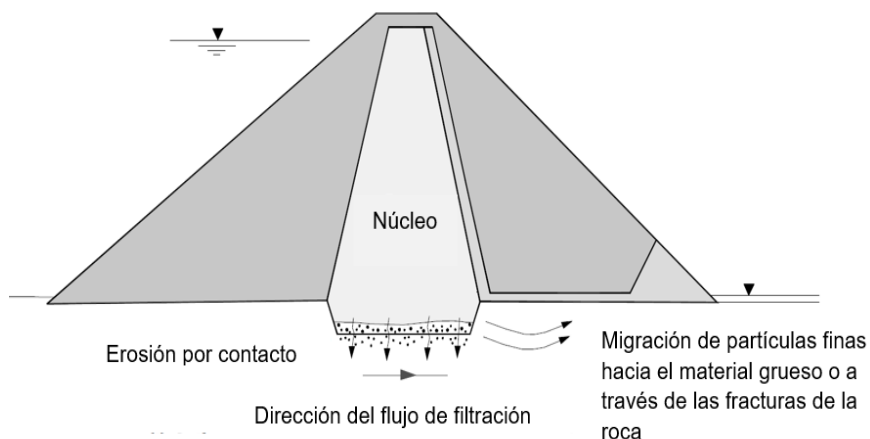


Figura 4.2. Erosión por contacto Núcleo cimentación

Durante el diseño de la presa, el proyectista debe profundizar su análisis y detectar otros lugares de fallas potenciales que pudiera presentarse en el cuerpo de la presa. para esto el diseñador debe contar con la suficiente información a ser proporcionado principalmente por el ingeniero Geólogo o el Especialista en Mecánica de suelos.

La experiencia nos enseña que, en la cimentación nada es regular, ésta puede presentar una distribución de materiales desde lo más claramente estratificado como también caótica. El diseñador de presas o el especialista encargado de la información geológica geotécnica, tiene que poseer la suficiente destreza, para elaborar el MODELO GEOTÉCNICO a utilizar en el cálculo de la filtración.

No es menos importante, de antemano el proyectista identifica los lugares críticos del cuerpo y cimentación de la presa, en donde se presenten las mayores magnitudes de los Gradientes hidráulicos, y en correspondencia con esto, tener la información del suelo a ser utilizado en el análisis de Inestabilidad Interna.

Para el caso específico de la figura N° 4.2, cimentación de suelo de granulometría gruesa, se procede a analizar de la siguiente manera:

- 1) Se aplica la Condición Geométrica y se determina si el material de la cimentación es Internamente Estable o no lo es. En el caso de resultar Internamente estable, solamente quedaría, realizar la comprobación geométrica si el material del núcleo (sobre todo las partículas finas) no va a ser transportada a través de los poros del material de la cimentación.
- 2) En el siguiente paso se analizará la condición Hidrodinámica, para comprobar si las condiciones de filtración posibilitan el lavado de las fracciones finas.

5.0 CONDICIONES EN ANÁLISIS DE LA EROSIÓN POR CONTACTO

Como ya se ha explicado líneas arriba, para realizar el análisis de la Erosión Interna en suelos, se deben analizar siguiendo los criterios establecidos por las siguientes condiciones:

- **CONDICIÓN GEOMÉTRICA:** los poros de la capa gruesa deben ser lo suficientemente grandes como para permitir el paso de partículas finas.
- **CONDICIÓN HIDROMECÁNICA O HIDRÁULICA:** El Gradiente Hidráulica o la velocidad del flujo debe ser suficiente para afectar las partículas finas y transportarlas hacia la capa de material más grueso.

En la verificación, si los materiales analizados cumplen la condición geométrica, se utilizan una serie de propuestas o modelos que se señalan en los siguientes numerales, en este artículo se ha privilegiado la propuesta del Instituto de Investigación Hidrotécnica V. E. Vedenev de San Petersburgo (Rusia), tanto para establecer la condición Geométrica como Hidrodinámica.

Para el análisis de la condición hidrodinámica, existen también otros modelos, sin embargo, muchas veces resultan un tanto complicadas por la variabilidad e incertidumbre de la información como datos de ingreso que se necesitan.

En esta publicación se le da mayor importancia a la metodología soviética, que actualmente está respaldada en mucha literatura mundial sobre el problema de la Erosión Interna y mencionada en las publicaciones del ICOLD.

Si a partir de los resultados del uso de cualquier modelo para establecer la condición geométrica, resultará que el material fino del suelo no podrá ser lavado aun presentándose gradientes de gran magnitud, se dice que el suelo es INTERNAMENTE ESTABLE, entonces ya no es necesario analizar la condición Hidrodinámica, lo contrario obliga a continuar con el análisis mencionado.

6.0 MODELOS PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN GEOMÉTRICA

Producto de las investigaciones a nivel mundial sobre el fenómeno de la Erosión Interna, se han planteado una serie de metodologías para pronosticar la inestabilidad de suelos (CONDICIÓN GEOMÉTRICA).

La Inestabilidad Geométrica demuestra que en la cimentación o cuerpo de la presa analizada, por su estructura granulométrica existe la posibilidad de un arrastre de las fracciones finas por el flujo filtrante, a través de los poros que forman las fracciones gruesas.

Para la evaluación de la inestabilidad existen una serie de propuestas o modelos de investigadores que se mencionan a continuación y se encuentran en la literatura especializada:

- Isotomina
- De Mello
- Kenney y Lau
- Kezdi
- Sherard
- Burenkova
- Wan a Fell
- Soviético

6.1 Método de Kenney y Lau

El método de mayor uso es el propuesto por Kenney y Lau (1985), quienes analizaron la estabilidad interna de los filtros granulares, investigando la relación entre el número de partículas que pueden ser arrastradas en un filtro y el número de partículas que forman los intersticios (poros) suficientemente pequeñas para impedir el paso de estas partículas potencialmente a ser arrastradas. Expresaron esta relación como una "curva de forma" (*shape curve*), que depende solamente de la forma geométrica de la curva granulométrica.

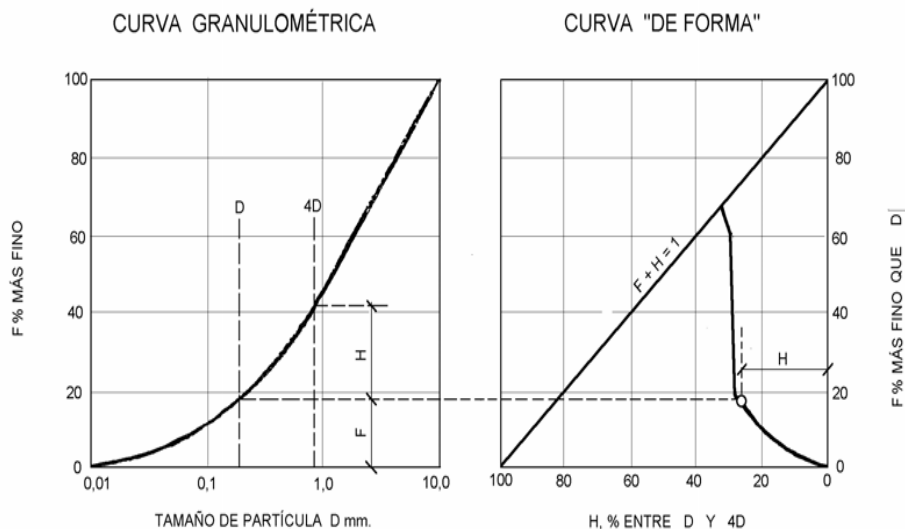


Figura 6.1 Método de obtención de la "Curva de Forma" (Kenney y Lau 1985)

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

En cualquier punto de la curva granulométrica, el porcentaje de partículas menores que el diámetro D será F ; el porcentaje de partículas que pueden impedir el paso de la fracción anterior será el comprendido entre D y $4D$, por cuanto los tamaños superiores forman los poros mayores a D . En el diagrama de la derecha se dibuja H en función de F . El punto que representa el extremo más grueso estará en la línea $F+H=1$ (para algunos igual a 1.3).

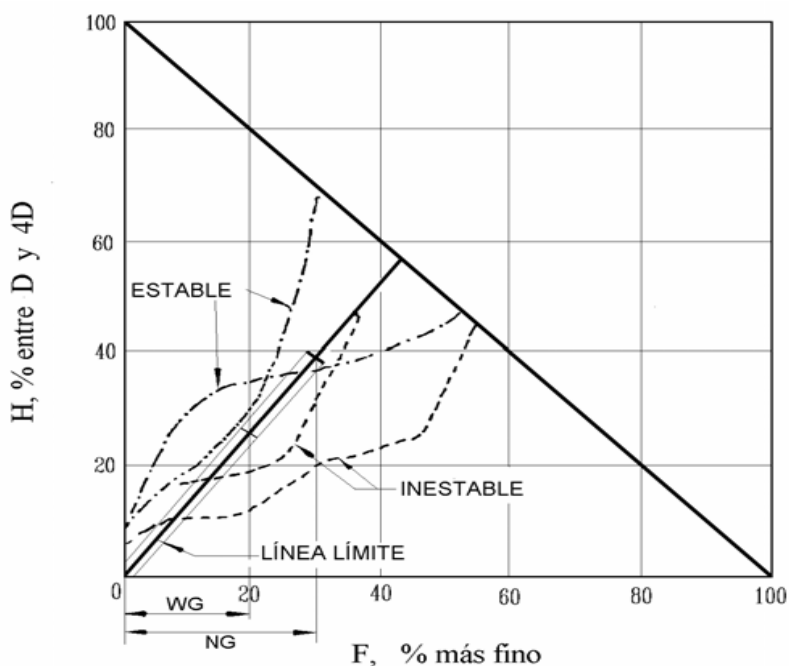


Figura N° 6.2 Límite entre suelos estables e inestables (Kenney y Lau 1985)

En la figura N° 6.2 los ejes se han girado 90° en relación con la anterior. La línea límite la frontera entre los suelos estables y los inestables, da los menores valores de H que son necesarios para asegurar la estabilidad. A los suelos inestables les falta proporción suficiente de algunos tamaños, como demuestran las curvas de forma situadas en la zona inferior. Solo la porción de curva que se refiere a partículas sueltas tiene importancia en la inestabilidad, así que el campo de aplicabilidad de la banda límite, varía según el tipo de suelo al que se quiere aplicar este criterio. De acuerdo a este modelo:

- Suelos ampliamente graduados con $C_u > 3$, se considera desde 0 a 20% porcentaje que pasa de la curva granulométrica.
- Suelos más uniformes con $C_u < 3$, las fracciones desde 0 a 30% como porcentaje que pasa de la curva granulométrica.

El método más seguro para determinar si un material granular es internamente inestable es realizar un ensayo de filtración; pero estos ensayos son complicados no deben recomendarse más que en casos especiales. Para que puedan obtenerse resultados significativos son necesarios procedimientos de ensayos muy cuidadosos, como el descrito por Kenney y Lau (1985).

El límite definido por Kenney en la Figura N ° 6.2, supone que los suelos son estables cuando $H > 1,3 F$. En las conclusiones de su artículo de 1989, él mismo

considera que las condiciones del ensayo eran conservadoras y excesivamente severas, por lo que propone que basta cumplir

$$H \geq F \quad (6.4)$$

Los modelos anteriores tienen sus propias limitaciones, porque está referido solamente al análisis geométrico (granulometría), más no al hidrodinámico (Gradiente hidráulico).

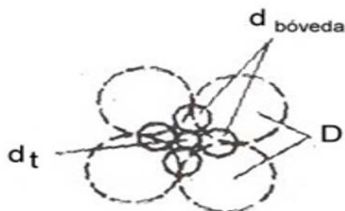
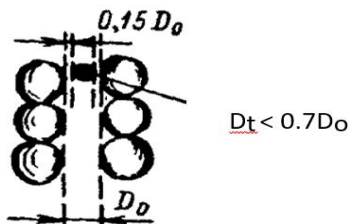
6.2 Modelo soviético

Además de los métodos que se han indicado líneas arriba, existe desde años atrás una propuesta interesante y completa desarrollada en la ex Unión Soviética, porque además del análisis geométrico propone una metodología del análisis hidrodinámico e inclusive proponiendo expresiones para determinar la cantidad o porcentaje de material que puede ser arrastrado por el flujo filtrante.

6.2.1 Criterio para determinar la Erosión Interna de un suelo

Las dimensiones de los diámetros de cálculo de las fracciones que forman un arco se determinan a partir de la condición de IMPENETRABILIDAD.

En el caso de dos suelos en contacto, de diferente granulometría para garantizar la impenetrabilidad de las fracciones finas en los poros del suelo grueso, es



Numerosos experimentos con fracciones uniforme y filtros de fracciones variables han mostrado que la bóveda estable se forma en la zona de contacto y el diámetro de los intersticios del filtro es menor al diámetro de la fracción que forma la bóveda en 1.8 veces a menos.

Luego la condición para que el suelo protegido (fino) no penetra en el filtro (o suelo grueso), se expresa en la forma siguiente:

$$\frac{D_0}{d_{bóveda}} \ll 1.8 \quad (6.2)$$

En otra manera:

$$d_{bóveda} \gg 0.555D_0 \quad (6.3)$$

En donde:

D_0 -Diámetro medio de los poros que forma el material grueso

$d_{bóveda}$ - Diámetro de las fracciones que forman la bóveda del material fino

6.2.2 Determinación del diámetro de Cálculo de los intersticios en suelos no cohesivos

El Diámetro promedio de los intersticios del material grueso o filtro de acuerdo a la metodología de VNIIG (Instituto de investigación de San Petersburgo) se calcula con ayuda de la fórmula propuesta por M. P. Pavchich:

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

$$D_0 = 0.46 \sqrt[n]{Cu} \frac{n}{1-n} D_{17\%} \quad (6.4)$$

- n - Porosidad del material
 Cu - Coeficiente de Uniformidad del material
 $D_{17\%}$ - Dimensión de las fracciones correspondiente al 17%.

El coeficiente de Uniformidad

$$C_U = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}} \quad (6.5)$$

El diámetro máximo de los intersticios de un suelo **no cohesivo** se calcula de:

$$D_0^{máx} = \chi D_0 \quad (6.6)$$

En donde:

χ - Coeficiente de distribución heterogénea de las fracciones del suelo, se determina:

- a) Para suelos con Coeficiente de Uniformidad $Cu \leq 25$

$$\chi = 1 + 0.05 Cu \quad (6.7)$$

- b) Para suelos con $Cu > 25$

$$\chi = 0.35(3 + \sqrt[3]{Cu} \lg Cu) \quad (6.8)$$

Se propusieron dos modelos para determinar si los suelos estarán expuestos a la Erosión interna. Estas metodologías muestra el siguiente proceso:

Primer Modelo. Un suelo se considera afecto a la Erosión Interna si se cumple la siguiente condición:

$$d_t < D_0^{m\acute{a}x} \quad (6.9)$$

En donde $D_0^{m\acute{a}x}$ se calcula a partir de la fórmula (6.6)

El tamaño máximo de la fracción de suelo $d_t^{m\acute{a}x}$ a ser arrastrado, por no estar protegido adecuadamente, se puede determinar con ayuda de la siguiente fórmula:

$$d_t^{m\acute{a}x} \leq 0.77D_0^{m\acute{a}x} \quad (6.10)$$

Por lo tanto, el cálculo consiste en determinar el diámetro de las fracciones d_{min} y su porcentaje en peso, que serán potencialmente arrastradas por el flujo, estas fracciones serán:

$$d_t^{m\acute{a}x} = 0.77D_0^{m\acute{a}x} < d_{min} \quad (6.11)$$

Las fracciones que cumplan la condición establecida por la expresión (6.11) se consideran NO AFECTAS a la Erosión Interna. Se puede no considerar la Erosión interna, si la magnitud d_{min} no cumple la relación (6.11), pero representa menos del (3-5)% de la masa del suelo.

Segundo Modelo El material no cohesivo de una determinada granulometría, se puede considerar geoméricamente exento a la Erosión Interna, si sus fracciones satisfacen la siguiente relación:

$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N \quad (6.12)$$

$$N = 0.32 \sqrt[6]{Cu}(1 + 0.05Cu) \frac{n}{1 - n} \quad (6.13)$$

En donde:

n -Coeficiente de porosidad del suelo protegido

Cu -Coeficiente de uniformidad del suelo protegido

Esta condición llamada también **Estabilidad interna** del propio material. Si no cumple la relación (6.12), entonces el suelo estará expuesto a la Erosión Interna.

Las expresiones arriba indicadas, pueden ser aplicadas a **UN SOLO** suelo del cuerpo de la presa o su cimentación, o también puede aplicarse a dos tipos de suelos en contacto de granulometría diferente. Por ejemplo, para un suelo se

puede determinar el valor máximo de los vacíos o poros que forman sus fracciones grandes, es decir, determinar la magnitud de $D_0^{máx}$, al mismo tiempo, puede determinar cuál es el tamaño o diámetro de sus fracciones finas $d_t^{máx}$, potencialmente lavables o transportada por el flujo filtrante. Con esto, se podrá demostrar que el suelo analizado es INTERNAMENTE ESTABLE o no lo es (Condición Geométrica).

Para **DOS** suelos de diferentes granulometrías, para el material más grueso, se determina la magnitud de $D_0^{máx}$, luego con ayuda de la fórmula (6.11) conocida también su granulometría, se puede determinar cuál es el tamaño máximo que puede ser lavado y que porcentaje representa.

7.0 MODELO PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN HIDRÁULICA O HIDRODINÁMICA PARA LA EROSIÓN POR CONTACTO.

7.1 Modelo Soviético

A continuación, se desarrolla el procedimiento de análisis para determinar si en el contacto de dos capas de materiales de diferente granulometría, es posible la presencia de la Erosión por contacto.

La señal de la presencia o no del fenómeno de Erosión por contacto se realizará mediante la comparación de valores de la Gradiente Hidráulica o velocidades de filtración, en la forma que se muestra en las fórmulas (7.1) y (7.2).

$$J_{cál} \leq \frac{1}{K_s} J_{con.crit} \quad (7.1)$$

$$V_{cál} \leq \frac{1}{K_s} V_{con.crit} \quad (7.2)$$

En donde:

- $J_{cál}$ -Gradiente hidráulico promedio calculado que actúa en la zona de filtración analizada;
- K_s -Factor de seguridad que depende de la Clasificación de la Presa por el Riesgo Potencial

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

$J_{con.Crít,t}$ -Gradiente hidráulico crítico que se calculan con ayuda de las expresiones que se indican más adelante.

TABLA 7.1. Coeficiente de Seguridad

CLASE DE PRESA	K_s
A	1.25
B	1.20
C	1.15

De cumplirse la Condición (7.1) o (7.2), la presencia del fenómeno de erosión por contacto NO ES POSIBLE.

Por el contrario de no cumplirse la Condición (7.1) o (7.2), entonces se presentará el fenómeno de Erosión Por contacto, luego debe aplicarse alguna solución ingenieril para evitar la presencia de dicho fenómeno. Como guía se puede actuar de la siguiente manera:

- Si el problema se puede presentar entre dos capas ubicadas por encima de la superficie de terreno, entonces se debe colocar un material de transición entre las dos capas, o el material superficial cambiar su granulometría.

- b) En el caso de los suelos que se encuentran en la cimentación, la solución de colocar un material como se ha indicado líneas arriba no es posible, por lo tanto, para esta situación debemos disminuir la magnitud de la Gradiente hidráulica mediante el uso de elementos de Impermeabilización, por ejemplo: dentellones, delantales, pared diafragma, etc.

La solución técnica y económicamente factible debe ser analizada para cada caso en particular.

7.1.1 Suelo fracciones finas no cohesivos-suelo fracciones gruesas

Si dos suelos NO SON AFECTOS A LA EROSIÓN INTERNA (ejemplo material del cuerpo de la presa de fracciones finas en contacto con fracciones gruesas), están en contacto entre sí, entonces la deformación por filtración no tendrá lugar si se cumple la siguiente condición:

$$\frac{D_o}{d_{5\%}} \leq 5.4 \quad (7.3)$$

En donde:

D_o -Dimensión promedia de los intersticios que forman las fracciones del suelo grueso

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

$d_{5\%}$ - Dimensión correspondiente al 5% de la curva granulométrica del material fino

D_o se determina con ayuda de la siguiente fórmula:

$$D_o = 0.46 \sqrt[n]{C_u} \frac{n}{(1-n)} D_{17} \quad (7.4)$$

En donde:

C_u - Coeficiente de Uniformidad

n - Coeficiente de Porosidad

D_{17} - Diámetro correspondiente al 17% de la curva granulométrica del material grueso

De no cumplirse la condición (7.3) que representa la CONDICIÓN GEOMÉTRICA, entonces se debe pasar a la siguiente etapa de análisis que corresponde la CONDICIÓN HIDRODINÁMICA.

a) Para el elemento de material fino **NO COHESIVO**, el Gradiente Crítico a la Erosión Por Contacto, se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$J_{con.crit} = \frac{1}{\sqrt{\varphi_1}} \left(2.3 + 15 \frac{d_{5\%}}{D_o} \right) \frac{d_{5\%}}{D_o} \sin \left(30^\circ + \frac{\theta}{8} \right) \quad (7.5)$$

En donde:

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

- θ -Ángulo entre la dirección del movimiento del flujo y la dirección de la gravedad (Figura N°7.1)
- φ_1 -Coeficiente que tiene en cuenta la forma y rugosidad de la fracción del suelo grueso, se toma de la Tabla 7.2.

TABLA 7.2. valores de φ_1

TIPO DE SUELO	φ_1
Canto rodado gravo arenoso	1
Áridos machacados	0.35-0.4

Es importante indicar que el ángulo θ , se determina luego de realizar los cálculos de filtración, a partir del cual se determina la magnitud y dirección del vector de velocidad del flujo filtrante.

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

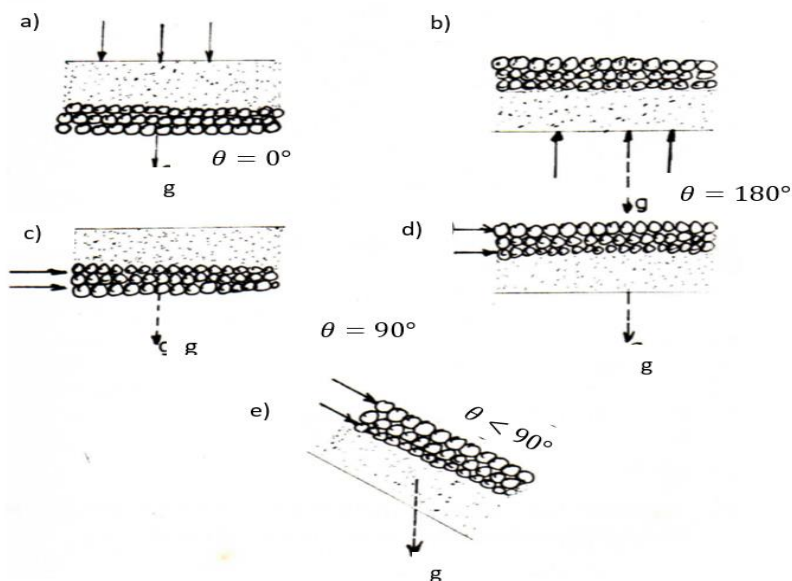


Figura N° 7.1 Ángulos que forma la dirección del flujo con la gravedad.

La velocidad Crítica de Erosión por contacto será igual a:

$$V_{con.crit} = KJ_{con.crit} \quad (7.6)$$

En la fórmula (7.5) en forma tácita se acepta que las fracciones máximas aceptables a ser lavadas se limita al 5% de su curva granulométrica.

En el proceso del análisis se puede plantear la pregunta ¿para el valor del gradiente de cálculo obtenido, qué tamaño de fracción puede ser lavada o arrastrada?, para esto la fórmula (7.1) se incorpora en la fórmula (7.5). Por otra

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

parte, si se desea determinar el tamaño de partícula a ser arrastrada a través del D_0 del material grueso, en lugar del término $d_{5\%}$, lo reemplazamos por el término incógnito d_t . Por lo tanto, la expresión (7.5) se convierte en una ecuación con una incógnita d_t .

$$J_{cál}K_S = J_{con.crit} = \frac{1}{\sqrt{\phi_1}} \left(2.3 + 15 \frac{d_t}{D_0} \right) \frac{d_t}{D_0} \sin \left(30^\circ + \frac{\theta}{8} \right) \quad (7.7)$$

Determinado el valor de d_t recurrimos a la curva granulométrica del material fino y determinamos que porcentaje del material arrastrado corresponde.

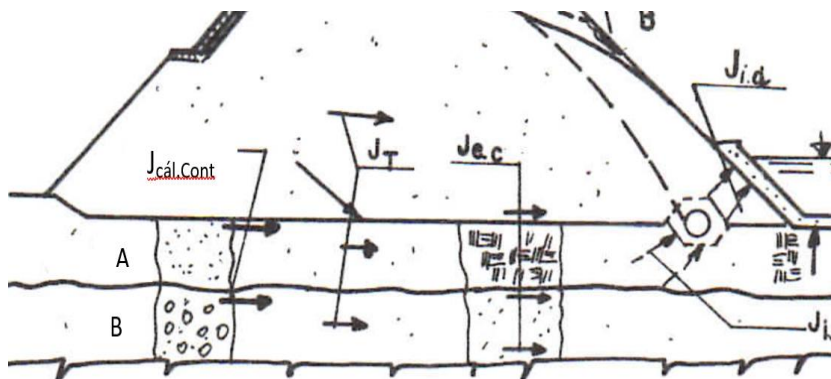


Figura 7.2 Cimentación estratificada con suelos diferentes.

En la práctica se puede encontrar una cimentación naturalmente estructurada como se muestra en la figura 7.2. Por efecto de la Gradiente hidráulica $J_{cál. cont}$,

puede tener lugar la Erosión Interna por contacto entre el suelo A (fracciones finas) y el suelo B (fracciones gruesas), en este caso se debe actuar de la siguiente manera:

- 1) Se comprueba si los suelos son internamente estables (condición geométrica), puede resultar que ambos son internamente estables, pero eso no implica que no se va a producir una Erosión interna por efecto del contacto de los dos suelos de diferente granulometría.
- 2) Definido el Gradiente de cálculo a partir de los respectivos cálculos de filtración, se determina el valor de D_0 para el suelo **B** (fracción gruesa), luego a partir de la fórmula (7.7), se puede calcular el tamaño de la fracción fina d_t del material **A** que será lavado.
- 3) Conocido el valor de d_t , se recurre a la curva granulométrica que representa el material fino, se calcula el porcentaje (%) de las fracciones a ser lavadas y concluimos si el porcentaje de fracciones a ser lavadas se encuentran por debajo de 3%, lo cual implica prácticamente que no se presentará la Erosión Interna por contacto.

7.1.2 Suelo Cohesivo -suelo fracciones gruesas

Si el material fino se construye de un material **COHESIVO** con índice de plasticidad $IP \geq (3-5)\%$, el valor del Gradiente Crítico a la Erosión por contacto se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$J_{con.crit} = \left(\frac{1}{\sqrt{D_0^{máx}}} - 0.75 \right) * \beta \quad (7.8)$$

$$\beta = 0.76 + \frac{\sin \theta}{6.5} \quad (7.9)$$

La magnitud $D_0^{máx}$ corresponde al material grueso, se calcula a partir de la fórmula (6.6).

En la Figura 7.3, se muestra una parte del Núcleo, filtro y el espaldón aguas abajo. Los valores de las Gradientes hidráulicos de cálculo en el tramo de colgado de la Línea superior de filtración en el núcleo, se determinan a partir de los cálculos de filtración con ayuda de los programas o software existente, también construyendo manualmente de la red de flujo.

FALLA POR FILTRACIÓN EROSIÓN POR CONTACTO EN PRESAS DE MATERIALES DE PRÉSTAMO

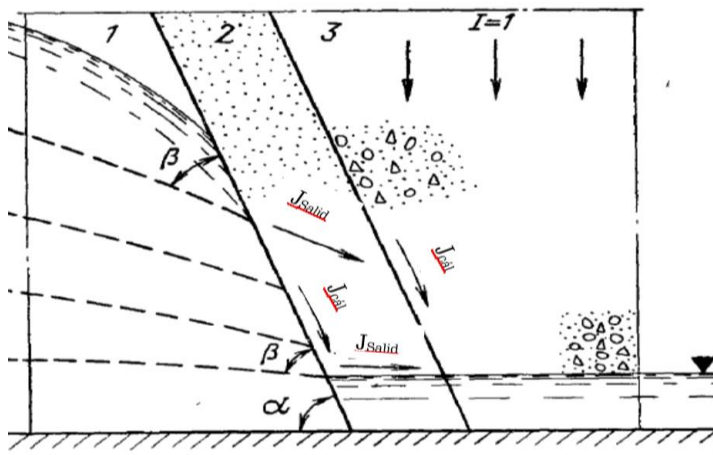


Figura 7.3. Gradientes hidráulicos de cálculo

1. Núcleo de la Presa
2. Filtro
3. Espaldón aguas abajo
4. J_{Salida} -Gradiente de Salida
5. $J_{cál.}$ -Gradiente hidráulico para una filtración de contacto

La Gradiente hidráulica del flujo en su salida del núcleo hacia la primera capa del filtro, se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$J_{Salida} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (7.10)$$

Como lo demuestra la práctica del diseño de presas de tierra, los datos de campo, los experimentos de las investigaciones y los cálculos respectivos, la Gradiente determinante para la comprobación a la Erosión Interna, está representada por la magnitud $J_{cál.}$

Por lo tanto, para la comprobación de la erosión interna por contacto a lo largo de su talud aguas abajo del núcleo, se puede determinar con ayuda de la siguiente expresión:

$$J_{cál.} = \sin \alpha \quad (7.11)$$

Como ya se explicado esta Gradiente debe ser menor que la Gradiente Crítica. El proceso de cálculo, es similar a lo explicado para dos suelos no cohesivos.

8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) El objetivo principal de esta publicación es demostrar a los profesionales especialistas en el diseño de presas, sobre la **NECESIDAD** de garantizar la Estabilidad de la Presa de tierra o materiales de préstamo, mediante el análisis de la EROSIÓN INTERNA o la Resistencia a la filtración de dichas estructuras.
- 2) No es el cálculo de Estabilidad de Taludes, Tensión-Deformación los análisis determinantes en garantizar la estabilidad de la Presa, por el contrario, las estadísticas de presas falladas señalan que la Erosión Interna y sobre vertimiento de la presa (Overtopping), constituyen aproximadamente el 92% de las causas de falla.
- 3) También es objetivo de esta publicación demostrar y reiterar que existen metodologías para pronosticar la estabilidad de la presa a la Erosión interna. Por lo tanto, esta herramienta debe ser aplicada en el análisis de estabilidad de una presa, previa a los otros análisis.
- 4) Llamar la atención que el fenómeno de Erosión Interna y Resistencia a la falla por filtración de la Presa está asociada a la parte de las fracciones finas de la Curva Granulométrica del suelo, por lo tanto, es inadmisibles observar que las curvas granulométricas solicitadas a los

laboratorios en todos los proyectos de nuestro país sobre presas, se obvia la granulometría de las fracciones que pasan por el tamiz # 200.

- 5) La inexistencia de Normas nacionales sobre el diseño de presas, lleva a los profesionales a realizarlos posesionando esta decisión en el campo del DIBUJO, mostrando la precariedad de nuestro conocimiento sobre Presas.
- 6) Por lo tanto, esta publicación también desea llamar la atención en la forma tan EMPÍRICA que se desarrolla el diseño de presas en nuestro país, es una opinión como resultado de las múltiples revisiones de los proyectos de presas realizadas por el autor en su participación como Consultor de varios proyectos.

9.0 BIBLIOGRAFÍA

1. **BRIONES GUTIÉRREZ J. E.** PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO. Resistencia a la Falla por Filtración. 1994.
2. **BRIONES GUTIÉRREZ J. E.** PRESA LIMÓN-PROYECTO OLMOS ANÁLISIS DE FILTRACIÓN- RIESGOS E INCERTIDUMBRE. Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Chiclayo XVII-2009.
3. **BRIONES GUTIÉRREZ J. E.** PRESAS DE TIERRA SOBRE CIMENTACIONES BLANDAS. SEGURIDAD A LA FALLA POR FILTRACIÓN. Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Chiclayo XVII-2009.
4. **BRIONES GUTIÉRREZ E. J.** RED DE FLUJO EN SECCIONES TÍPICAS DE PRESAS DE TIERRA HOMOGÉNEA. Junio 2014
5. **BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW).** INTERNAL EROSION. 2013. GERMANY 2013.
6. **FELL R. MAC GREGOR P.,** GEOTECHNICAL ENGINEERING OF DAMS. London 2005.
7. **FELL R., & JEAN-JACQUES F.** INTERNAL EROSION OF DAMS AN THEIR FOUNDATIONS. London 2017.
8. **HANS RÖNNQVIST, PETER VIKLANDER.** ON THE KENNEY-LAU APPROACH TO INTERNAL STABILITY EVALUATION OF SOILS. Julio 2014
9. **CHUGAEV R. R.** OBRAS HIDRÁULICAS. Edit. Escuela Superior Leningrado-URSS. 1985 (IDIOMA RUSO).

10. **ICOLD**. INTERNAL EROSION OF EXISTING DAMS, LEVEES AND DIKES, AND THEIR FOUNDATIONS. Bulletin 164.2016
11. **INSTITUTO DE INVESTIGACIONES HIDROTÉCNICAS "B. V. VEDENEEV"** Guía para el Cálculo de la Resistencia de estructuras de Tierra a la falla por filtración en centrales de acumulación. Leningrado-URSS. 1981. (IDIOMA RUSSO)
12. **MATTSSON H., HELLSTROM J. AND LUNDSTROM. ON INTERNAL EROSION IN EMBANKMENT DAMS.** Lulea University of Technology. Sweden. 2008.
13. **ORDENES COCIO S. A.** INESTABILIDAD INTERNA EN MATERIALES DE ORIGEN GLACIAL. Universidad de Chile. Julio 2008.