

PRESAS DE TIERRA SOBRE CIMENTACIONES BLANDAS. **SEGURIDAD A LA FALLA POR FILTRACION**

Ms. Sc. BRIONES GUTIERREZ JORGE E.

jebriones@hotmail.com

RESUMEN

El presente artículo denominado **PRESAS DE TIERRA SOBRE CIMENTACIONES BLANDAS RESISTENCIA A LA FALLA POR FILTRACION**, tiene por finalidad explicar algunos criterios para analizar la estabilidad de la cimentación blanda a los efectos del flujo filtrante, es decir, **Erosión Interna**. Estas cimentaciones pueden ser de material granular no cohesivo (aluvial: limo, arena-grava, canto rodado), cohesivo (material arcilloso).

Además se explica el proceso de cálculo para diagnosticar la presencia de la erosión interna en la cimentación de la Presa. El fenómeno de Erosión Interna se presenta con mayor frecuencia en suelos no cohesivos, por esta razón las recomendaciones de este artículo son aplicables a este tipo de suelos.

Actualmente en diferentes partes del mundo se han desarrollado Teorías y se ha elaborado métodos para pronosticar la posibilidad de la presencia de la erosión interna. Estas metodologías son distintas una de las otras, pero indudablemente son instrumentos importantes de diagnóstico.

En este artículo se tratará una metodología que fue desarrollada por los soviéticos, cuyo análisis sigue el siguiente proceso

1. Determinar el Gradiente Hidráulico promedio para la cimentación.
2. Conocida la Granulometría de la Cimentación, se determina si el suelo es va a experimentar una erosión interna.
3. Se calcula la Gradiente hidráulica y la Granulometría representativa del suelo, se calcula que porcentaje del Volumen de suelo, será arrastrado por el flujo filtrante.

4. El arrastre de más del 5% por peso de la masa de suelo significa, que la presa estará expuesta a problemas de Inestabilidad debido a la Filtración.

El autor espera que leído este artículo se entienda la seriedad que requiere el análisis de filtración en el diseño de presas. Algunos proyectistas piensan que el estudio de este tema solo abarca el compromiso de determinar la RED de Flujo.

Finalmente la metodología desarrollada en este artículo a criterio del autor es gratamente aplicable en Presas de mediana y gran altura, por esta razón la información respecto a las características de los suelos que se necesita, van más allá de lo que seguramente el lector está acostumbrado a realizar.

1.0 INTRODUCCION

Al diseñar, construir y analizar el comportamiento de una presa se debe considerar que ella y su cimentación forman una unidad estructural, hasta el extremo que una presa es segura, si lo es también su cimentación.

Los suelos para apoyar o cimentar una presa, en raras ocasiones presentan la calidad y características necesarias para satisfacer los requisitos exigidos, de resistencia, estabilidad e impermeabilidad adecuados. Será pues necesario mejorar sus condiciones naturales.

Un buen estudio de una cimentación débil debería darnos más confianza que un estudio deficiente de una buena cimentación, pues

ésta puede ocultar problemas importantes como:

- Erosión en el cimientto
- Erosión en el contacto presa-cimiento

En terreno potencialmente erosionable lo esencial es el control de las filtraciones, control orientado a reducir su caudal, su gradiente y proteger su salida aguas abajo mediante dispositivos adecuados.

Los tratamientos más comunes tienen dos objetivos:

- Reducir las pérdidas de agua: tendrá un carácter económico y en cada caso debe plantearse su necesidad.
- Evitar la Erosión Interna: es una necesidad ineludible.

Los procedimientos más utilizados para conseguirlos son:

- a) Las pantallas o cortinas profundas de inyección. (Fig. N° 01).
- b) Los tapices de material impermeable compactado.
- c) Otros

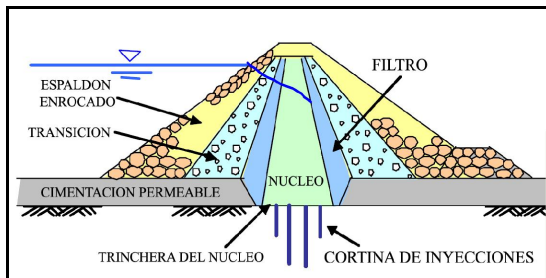


Fig. N° 01. Base de Núcleo intercepta material permeable de la Base.

2.0 FENOMENOS DE FILTRACION

Existen una serie de conceptos para diferenciar los diferentes tipos de ruptura Hidráulica, sin embargo no existe una frontera claramente divisoria entre uno y otro fenómeno.

La Erosión interna ocurre cuando las fracciones del cuerpo de la presa o

cimentación, son arrastradas hacia aguas abajo por flujo de la filtración

Tubificación es la forma de erosión interna que se inicia con la Erosión Regresiva, en una grieta o zona de alta permeabilidad, y el resultado es la formación de un "micro túnel" continuo llamado "tubo", que va desde aguas arriba hacia aguas abajo del cuerpo o cimentación de la Presa

La Erosión Regresiva implica la separación de las partículas de los suelos cuando la filtración sale por ejemplo al pie aguas abajo de la presa homogénea. Las fracciones arrastradas son sacadas por la filtración y el proceso trabaja gradualmente en dirección hacia aguas arriba del cuerpo de la presa o de su cimentación hasta que se forma un "tubo" continuo.

El Reventón se presenta cuando los Gradientes de Salida en el pie de presa son altos. En suelos cohesivos esta condición se conoce como fractura hidráulica, y se manifiesta en forma de ebullición.

En la Fig. N° 02, se muestra una presa sobre una capa arcillosa y por debajo de ella subyace una material permeable (granular). Se muestran las Líneas de corriente y el diagrama de fuerzas originadas por el Gradiente Hidráulico de Salida, que puede dar lugar al Reventón (suelo movido por el empuje).

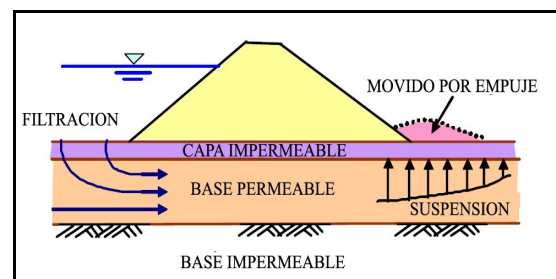


Fig. N° 02. Dique sobre una capa de Material Impermeable que yace sobre un Permeable.

En la Figura N° 03, se observa la presencia de una fractura en la capa cohesiva en el pie Aguas abajo de la presa, luego el material granular empieza a salir por esa fractura (Ebullición), luego se manifiesta en forma de erosión regresiva, y tiene lugar el fenómeno de Tubificación, cuyo canal se conectará al fondo del embalse.

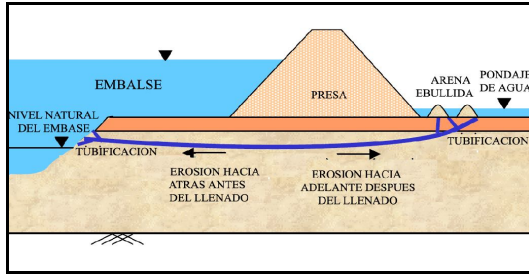


Fig. N° 03. Erosión Interna

La figura N° 03, trata de explicar como en una cimentación Homogénea el pie de Aguas abajo de la presa puede convertirse en una zona de Gradientes de Salida de gran magnitud, que pueden erosionar la zona mostrada

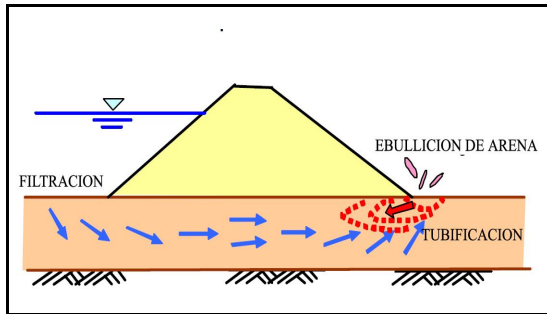


Fig. N° 03. Dique sobre una capa de Material permeable Ebullición de arena.

Muchas veces para eliminar los efectos negativos de los fenómenos expuestos anteriormente se recurren a soluciones como la mostrada en la Fig. N° 04, en donde el diafragma de concreto intercepta toda la zona Aluvial permeable, pero que su contacto con el cuerpo de la presa puede ser su "talón de Aquiles", y es aquí en donde se debe prestar atención.

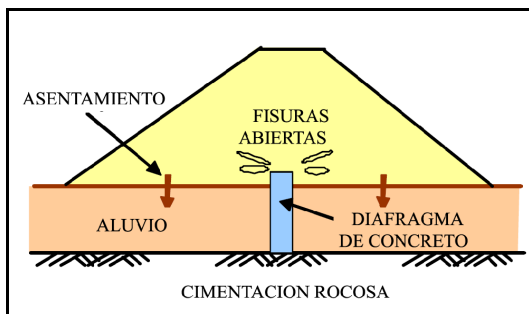


Fig. N° 04. Dique con diafragma de concreto que intercepta el material permeable.

3.0 EXPLICACION FISICA DE LAS FUERZAS FILTRANTES EN SUELOS

En el proceso de filtración la partícula, se puede idealizar bajo la acción de dos fuerzas: Presión hidrodinámica elemental, originada por la diferencia de Carga "P" antes y después de la partícula, y la fricción filtrante elemental " τ ", que actúa tangencial a la superficie de la partícula. La Resultante de estas dos fuerzas toma la dirección del movimiento del flujo.

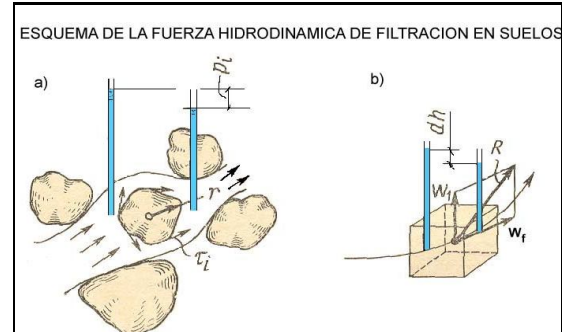


Fig. N° 05. Esquema de las fuerzas filtrantes que actúan sobre las fracciones del suelo.

El vector "R" se descompone en dos vectores: W_1 dirigida verticalmente, que representa la **fuerza Hidrodinámica elemental de suspensión** y el Vector W_f que tiene una dirección tangente a la línea de corriente y representa la **fuerza unitaria de filtración**. Estas fuerzas se expresan de la siguiente manera:

$$W_1 = (1 - n) \gamma_w \quad (3.1)$$

$$W_f = -\gamma_w \frac{dh}{ds} = -\gamma_w j \quad (3.2)$$

- γ_w - Peso específico del agua
- n - Porosidad o Relación de Vacíos
- j - Gradiente hidráulico unitario puntual y normal a las equipotenciales.

Luego fuerza total de filtración sobre una porción de Volumen (V) de suelo será:

$$F = J \gamma_w V \quad (3.3)$$

GRADIENTE HIDRAULICO.- Para un recorrido determinado, está dado por la relación

$$J = \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad (3.4)$$

ΔH - Pérdida de carga en el tramo analizado

ΔS - Longitud del tramo analizado o recorrido en donde se produce la pérdida de carga.

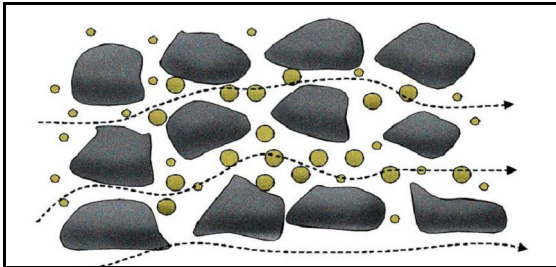


Fig. N° 06. Esquema del Fenómeno de Erosión interna.

4.0 SUELOS PROPENSOS A LA EROSION INTERNA

Sherard en 1969, clasifica los distintos materiales según se indica en el Cuadro N° 03.

CUADRO N° 03

REFERENCIA DE RESISTENCIA	CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS
Mejor resistencia a la Erosión interna	1. Arcilla de alta plasticidad (IP>15). Bien compactada 2. Arcilla de alta plasticidad (IP>15), mal compactada 3. Arena Bien graduada o mezcla de grava y arena con finos arcillosos de media plasticidad (IP>6).
Media resistencia a la Erosión interna	4. Arena bien graduada o mezcla de grava y arena con finos arcillosos de media plasticidad (IP>6). Bien compactado 5. Mezcla de grava, arena y limo bien graduado (IP<6) 6. Mezcla de grava, arena y limo bien graduada (IP<6). Mal compactada
Peor resistencia a la Erosión interna	7. Arena fina muy uniforme sin cohesión (IP<6). Bien compactada 8. Arena fina muy uniforme sin cohesión (IP<6). Mala compactada

5.0 INFORMACION BASICA PARA EL ANÁLISIS DE LA EROSION INTERNA

En la zona de emplazamiento de la presa se debe ejecutar una serie de calicatas cuyos resultados permitan elaborar las características de la cimentación.

Para el caso del análisis de filtración se debe obtener la siguiente información básica:

- A) Perfil de la presa
- B) Ubicación del sistema de filtros
- C) Modelo geotécnico de la cimentación
 - Granulometría curva completa (tamizado y vía húmeda)
 - Densidad
 - Permeabilidad de la cimentación o estratos.

Con esta información y las condiciones de filtración se pasa a la etapa de análisis correspondiente.

6.0 METODOLOGIA PROPUESTA PARA DIAGNOSTICAR LA RESISTENCIA A LA FALLA POR FILTRACION.

Para definir la estabilidad a la filtración, se plantea realizar dos tipos de cálculos.

El **Primer análisis**, es una comprobación tomando como referencia datos cuyas magnitudes proviene de información de muchas presas existentes. Esta comprobación se le denomina **RESISTENCIA A LA FALLA CASUAL POR FILTRACION**.

El **Segundo análisis** denominado **RESISTENCIA A LA FALLA LOCAL POR FILTRACIÓN**. Este tipo de análisis se realiza en lugares conocidos tanto del cuerpo de la Presa como en su cimentación.

7.0 DIAMETROS DE LOS INTERSTICIOS EN SUELOS NO COHESIVOS

El diámetro de los intersticios es un parámetro importante en el estudio de la Erosión Interna.

La Fig. N° 07, muestra la disposición de fracciones. Aquí $d_{bóveda}$, diámetro de las fracciones que obstruyen el intersticio y forman una bóveda, sin embargo no pueden sellar todo el espacio, permitiendo el paso de fracciones más pequeñas que se denominarán d_t .

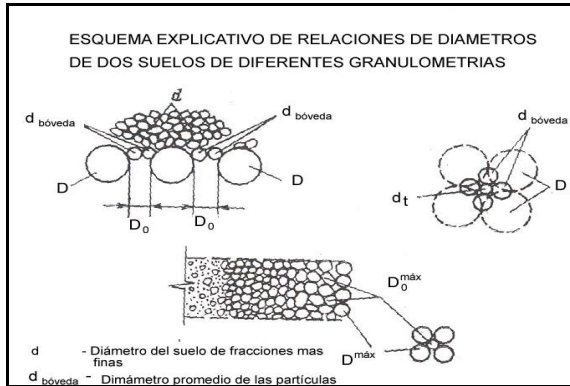


Fig. N° 07 Nomenclatura y esquema utilizada en el análisis de Erosión Interna.

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

El Diámetro promedio de los intersticios del suelo no cohesivo se determina con ayuda de la siguiente fórmula:

$$D_0 = 0.46 \sqrt[6]{C_U} \frac{n}{1-n} D_{17\%} \quad (7.1)$$

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

7.2 Diámetro máximo de los intersticios de un suelo no cohesivo

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

$$D_0^{máx} = \chi D_0 \quad (7.2)$$

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

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

$$\chi = 1 + 0.05 C_U \quad (7.3)$$

- b) Para suelos con $C_U > 25$

$$\chi = 0.35(3 + \sqrt[3]{C_U} \lg C_U) \quad (7.4)$$

8.0 SUELOS AFECTOS A LA EROSION INTERNA

En [Ref. 1] se propusieron dos metodologías para determinar cuando los suelos están expuestos a la Erosión interna. Una de estas metodologías muestra el siguiente proceso:

- 1) A partir de la Curva Granulométrica y utilizando las fórmulas (8.1) y (8.2), se determina si el suelo experimentará la Erosión Interna. **Condición GEOMETRICA.**
- 2) Conocida los parámetros de filtración, se determina los tamaños de fracciones a ser serán arrastradas por el flujo y en que porcentaje. **Condición HIDRODINAMICA.**

CONDICION GEOMETRICA. El material no cohesivo se puede considerar exento de Erosión Interna, si sus fracciones satisfacen la siguiente relación:

$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N \quad (8.1)$$

$$N = 0.32 \sqrt[6]{C_U} (1 + 0.05 C_U) \frac{n}{1-n} \quad (8.2)$$

Si no cumple la relación (8.1), entonces el suelo estará expuesto a la Erosión Interna.

CONDICION HIDRODINAMICA. - Conocido el Gradiente Hidráulico "J", se calcula que tamaño de partícula d_t será arrastrada del suelo por el flujo filtrante. Esto se realiza con ayuda de las siguientes fórmulas:

$$d_t = \frac{0.0036 J_{Diseño}}{\varphi_0 \sqrt{\frac{n}{K}}} \text{ cm} \quad (8.3)$$

$$J_{Diseño} = k_s J \quad (8.4)$$

$$\varphi_0 = 0.30(\gamma_d - 1) f_* \quad (8.5)$$

$$f_* = 0.82 - 1.8n + 0.0062(C_U - 5) \quad (8.6)$$

- $K_s=1.15$ - Coeficiente de seguridad
 J - Gradiente hidráulico determinado por cálculo.
 n - Porosidad
 K - Coeficiente de permeabilidad cm/seg
 γ_d - Pesos específico seco del suelo kg/cm³
 C_u - Coeficiente de uniformidad.

Luego de determinado el tamaño de la fracción d_t , recurrimos a la curva granulométrica del material de la cimentación y se determina que porcentaje representa. Si se obtiene que el porcentaje es menor al 5%, entonces el suelo prácticamente no experimentará los efectos de la Erosión interna. Caso contrario está afecto a la Erosión interna.

El efecto de la Erosión interna del material en volúmenes inaceptables, provocará también asentamientos en la presa inadmisibles.

9.0 ANALISIS A LA FALLA POR FILTRACIÓN DE CIMENTACIONES BLANDAS

9.1 Presa Homogénea sobre una cimentación permeable

En la Fig. N°08, se muestra una Presa homogénea, sin elemento de impermeabilización, que descansa sobre una capa homogénea permeable.

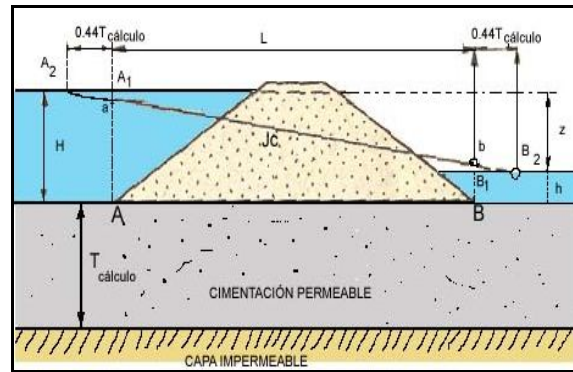


Fig. N° 08.- Presa sin Dentellón sobre una cimentación homogénea

La capa impermeable se ubica a una profundidad $T_{cálculo}$. En [Ref. 1] se propone una metodología para determinar la magnitud de J_c , denominado **Gradiente de Control**.

Partiendo de la Resistencia a la **falla Casual por filtración** del suelo, la Cimentación debe cumplir la siguiente condición:

$$J_c = (J_c)_{Admisible} \quad (9.1)$$

El valor de $(J_c)_{admisible}$ se toma del cuadro N° 04 , de acuerdo al tipo de suelo.

CUADRO N° 04

CUADRO PARA DETERMINAR EL VALOR DE $(J_c)_{admisible}$

SUELO DE LA CIMENTACIÓN	$(J_c)_{Admisible}$			
	I	II	III	IV
Arcilla compacta	0.90	1.00	1.10	1.20
Suelo arcilloso	0.45	0.50	0.55	0.60
Arena gruesa	0.36	0.40	0.44	0.48
Arena media	0.30	0.33	0.36	0.40
Arena fina	0.23	0.25	0.27	0.30

Previo a la elección de $(J_c)_{admisible}$, se determina la clase de presa del cuadro N°05

CUADRO N° 05

CUADRO DEL LA CLASE DE PRESA

SUELO DE LA CIMENTACION	ALTURA DE LA PRESA EN m, QUE DETERMINA LA CLASE DE OBRA			
	I	II	III	IV
Arenosa, detríticos, arcillosas en estado compacta y semi compacta	>75	35- 75	15- 35	<15
Arcillosas saturadas y estado plástico	>50	25- 50	15- 25	<15

La Resistencia a la **Falla Local** (Fig. N°08), se comprueba con el cumplimiento de la siguiente relación:

$$J_c \leq \frac{1}{k_s} J_{crit} \quad (9.2)$$

$$J_c = \frac{Z}{L + 0.88 T_{Cálculo}} \quad (9.3)$$

J_c - Gradiente de Control en el suelo de la cimentación.

$J_{crítico}$ – Gradiente crítico. Se determina por la siguiente expresión:

$$J_{Crítico} = 275 \varphi_O d_{5\%} \sqrt{\frac{n}{k}} \quad (9.4)$$

Las denominaciones de los parámetros se conservan.

CUADRO N° 06

**COEFICIENTE DE SEGURIDAD EN FUNCION
DE LA CLASE DE OBRA.**

CLASE DE OBRA	COEFICIENTE DE SEGURIDAD k_s
I	1.25
II	1.20
III	1.15
IV	1.1

9.2 Presa con dentellón Flotante.

En la práctica se encuentran casos cuando la capa Impermeable está bastante profunda ($T=\infty$) y la capa del material de la

cimentación es interceptada por un dentellón, que no llega a la capa impermeable (Fig. N°09).

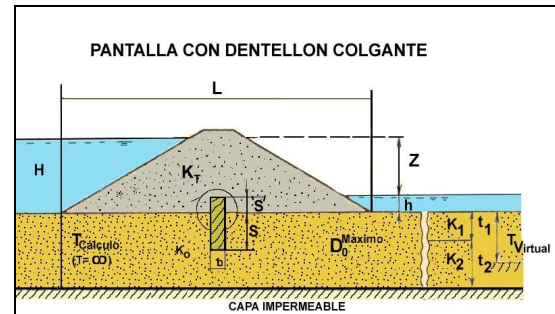


Fig. 09. Presa con Dentellón Flotante (no llega a la capa impermeable)

En este caso el material de la cimentación, la profundidad y espesor del dentellón colgante, tendrá que cumplir no solamente la Resistencia a la falla por filtración Casual sino también Local.

a) En primer lugar se determina la profundidad de cálculo de la capa impermeable $T_{cálculo}$.

De acuerdo a la metodología indicada en [Ref. 1] se tiene:

$$T_{cálculo} = T_{activa} = 0.5L \quad (9.5)$$

Si $T_{real} < 0.5L$, (en donde L ancho de la base de la Presa), entonces se toma:

$$T_{cálculo} = T_{real} \quad (9.6)$$

b) Si la cimentación de la presa es heterogénea, es decir, constituida de dos o mas suelos diferentes, tanto por sus permeabilidades ($K_1 \neq K_2$), y ancho ($T_1 \neq T_2$), entonces se debe transformar las capas en un suelo homogéneo y determinar la profundidad virtual de la capa impermeable $T_{virtual}$, de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$T_{Virtual} = T_1 + T_2 \frac{k_2}{k_1} + \dots \quad (9.7)$$

Con la magnitud encontrada de $T_{virtual}$, se determina el valor de cálculo de la profundidad de la capa impermeable $T_{cálculo}$, como se ha indicado en el punto a).

c) Para la Presa con el Dentellón colgante (fig. N° 09) el Gradiente hidráulico de control

de la Resistencia Local de filtración del suelo de la cimentación, se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$J_c = \frac{z}{L + 2S + 0.88T_{\text{cálculo}}} \quad (9.8)$$

El valor de Control obtenido por la fórmula (9.8), debe satisfacer la siguiente condición:

$$J_c = (J_c)_{\text{admisible}} \quad (9.9)$$

En donde $(J_c)_{\text{admisible}}$ se toma del cuadro N°04.

2) El valor determinado de J_c , también tendrá que cumplir la Resistencia a la falla local por filtración para la Granulometría del material de la cimentación, es decir:

$$J_c \leq J_{\text{crítico}} \quad (9.10)$$

Donde $J_{\text{crítico}}$ se determina con ayuda de la fórmula (9.4).

Como se deduce de la expresión (9.8), para disminuir J_c , se debe incrementar la profundidad "S" del dentellón (o construir dos dentellones)

3) La magnitud de J_D del propio dentellón, se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$J_D = J_c \frac{2S}{b} \leq J_{\text{cálculo}} \quad (9.11)$$

Si en la cimentación se construyen obstáculos, sobre el cual actúa el Gradiente J_D , entonces el suelo de la cimentación deberá tener tal composición granulométrica, que garantice la Resistencia a la falla por filtración del propio obstáculo (Dentellón).

Esta condición será satisfecha, si se cumpla la condición:

$$J_D \leq J_{\text{cálculo}} \quad (9.12)$$

Si la condición (9.12) no se cumple, entonces debe incrementarse el espesor "b" del obstáculo o tomar otra medida (por ejemplo construir dos obstáculos, ensanchar

la base de la Presa, etc.). La solución final se toma en base a comparaciones técnicas-económicas de variantes.

$J_{\text{cálculo}}$ para un dentellón construido de **suelo arcilloso**, se determina de la siguiente manera:

1) No se acepta la exfoliación de fracciones del suelo arcilloso por el flujo filtrante, que actúa sobre el dentellón (para las estructuras de clase I).

$$J_{\text{cálculo}} = \frac{0.69}{(D_0^{\text{máx}})^2} \quad (9.13)$$

En donde $D_0^{\text{máx}}$ viene a ser la dimensión máxima del intersticios del suelo de la cimentación, y se determina a partir de la fórmula (7.2).

2) Se admite una limitada exfoliación de las fracciones del suelo cohesivo, situación que no expone al Dentellón a una falla por filtración (estructura clase II-IV):

$$J_{\text{cálculo}} = \frac{1.69}{(D_0^{\text{máx}})^2} \quad (9.14)$$

$D_0^{\text{máx}}$ se determina por la fórmula (7.2) y además:

$$D_0^{\text{máx}} \leq 1.3 \text{ cm}$$

9.3 Presa con núcleo y dentellón colgante en forma de tablestaca o pared.

En la Fig. N° 6.3, se muestra una presa con Núcleo y Dentellón colgante sobre una cimentación permeable de profundidad $T=\infty$.

Si los espaldones de la presa se construyen con suelos de fracciones grandes, y el material de la cimentación es mas fina, entonces en la salida del flujo filtrante hacia el enrocado después del dentellón, puede producirse una falla local por filtración del material de la cimentación.

También la falla se puede presentar, si el elemento impermeabilizante que posee dimensiones insuficientes.

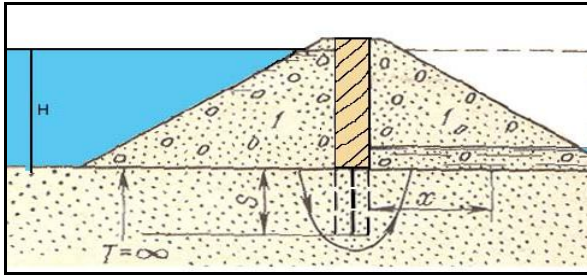


Fig. N° 10. Presa con Núcleo (diafragma) y Dentellón colgante.

El esquema de cálculo de la Presa de Materiales de Préstamo con Núcleo o diafragma y Dentellón colgante, se muestra en la Fig. N° 11.

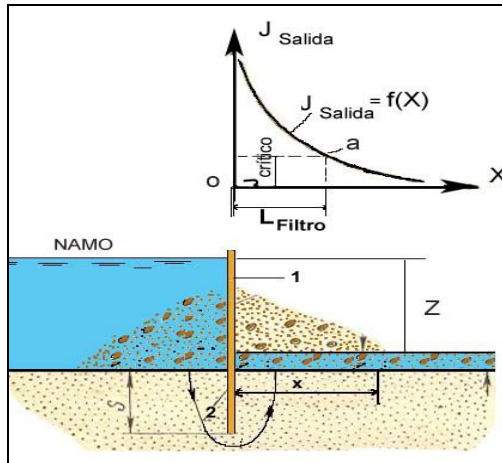


Fig. N° 11. Esquema de cálculo

- a) Si la cimentación permeable tiene una potencia ilimitada ($T=\infty$), entonces la gráfica de los Gradientes de Salida $J_{\text{salida}}=f(x)$ del flujo filtrante en la base del espaldón aguas abajo se calcula:

$$J_{\text{salida}} = \frac{Z}{\pi \sqrt{S^2 + X^2}} \quad (9.15)$$

- b) Para evitar la el Reventón o Ebullición del material de la cimentación, en la salida del flujo filtrante debe cumplirse la siguiente condición básica:

$$J_{\text{Salida}}^{\text{Máximo}} \leq J_{\text{admisible}} \quad (9.16)$$

$$J_{\text{admisible}} = \frac{1}{k_s} J_{\text{crítico}} \quad (9.17)$$

En este caso el valor del Gradiente Crítico se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$J_{\text{Crítico}} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) (1 - n) \quad (9.18)$$

- γ_s - Pesos específico de las partículas sólidas
 γ_w - Peso específico del agua
 n - Porosidad

Si se cumple la condición (9.16), entonces la Resistencia a la falla por filtración de la cimentación está garantizada.

Si la condición (9.17) no se cumple, entonces se debe realizar la prueba impenetrabilidad de material de la cimentación en los intersticios del material del Espaldón aguas abajo, por la condición:

$$\frac{D_o^e}{d_{\text{bóveda}}} \leq 1.8 \quad (9.19)$$

En donde D_o^e , viene a ser el diámetro promedio de los intersticios del material del espaldón aguas abajo, y se determina con ayuda de la fórmula (7.1).

Cuando el suelo de la cimentación no experimenta la Erosión Interna, se toma

$$d_{\text{bóveda}} \leq d_{50\%} \quad (9.20)$$

Si el suelo de la cimentación está afecto a la Erosión Interna, se considera

$$d_{\text{bóveda}} \leq d_{25\%} \quad (9.21)$$

Si la condición (9.19) se cumple, entonces estará garantizada la Resistencia a la falla por filtración del material de la cimentación.

En caso contrario, de no cumplirse la condición (9.16) y (9.19), es necesario ejecutar cualquiera de las siguientes medidas:

- 1) Incrementar la longitud "S" del dentellón, para satisfacer la condición básica (9.16)
- 2) En la base del espaldón aguas abajo se coloca una capa de filtro.

9.4 Presa con dentellón que llega a la capa impermeable.

En la Fig. N° 12, se muestra una presa de material impermeable de base con ancho "L". La presa descansa sobre una capa permeable de potencia $T_{\text{cálculo}}$ e interceptada por un dentellón impermeable que llega hasta la capa impermeable y penetra en ella en una profundidad S' , el espesor del dentellón "b", coeficiente de permeabilidad $K_{\text{presa}} \ll K_o$.

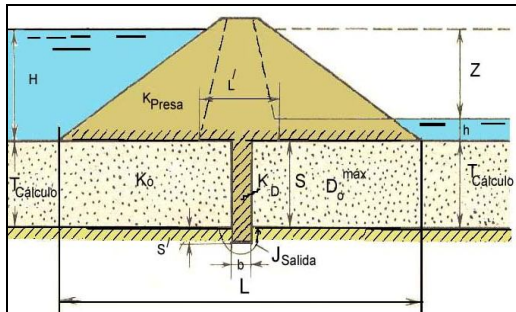


Fig. N° 12 Presa (Núcleo) con Dentellón que llega hasta la capa impermeable.

La magnitud del Gradiente en el material de la cimentación J_c para el tipo de presa (Fig. N° 12) con dentellón que llega hasta la capa impermeable, se determina por la siguiente fórmula:

$$J_c = \frac{Z}{L + 0.88 T_{\text{cálculo}} + b_{\text{virtual}}} \quad (9.22)$$

Cuando la presa es de tipo enrocado con núcleo impermeable en la fórmula (9.22) en lugar de L (ancho de la base de la presa), se debe colocar L' , que viene a ser el ancho del núcleo en su base.

El valor obtenido de J_c tendrá que satisfacer la condición (9.9), en donde $(J_c)_{\text{admisible}}$, se toma del cuadro N° 04, también tendrá que cumplir la condición (9.10).

LITERATURA

- 1.- **BRIONES GUTIERREZ J.** Presas de Tierra y enrocamiento. Resistencia a la Falla por Filtración. Lima Diciembre 1994.
- 2.- **FELL ROBIN & WAN CHI FAN.** METHODS FOR ESTIMATING THE PROBABILITY OF FAILURE OF EMBANKMENT DAMS BY INTERNAL EROSION AND PIPING IN THE FOUNDATION AND FROM EMBANKMENT TO FOUNDATION. The University of New South Wales-January 2005
- 3.- **INSTITUTO DE INVESTIGACIONES HIDROTECNICAS "B. E. VEDENEEV".** Guía para el cálculo de la Resistencia de Obras de tierra a la Falla por Filtración en Centrales de acumulación. Leningrado-URSS 1981.
- 4.- **MATTSSON, J. G. HELLSTRÓM & LUNDSTROM T. S..** On Internal Erosion in Embankment Dams. Lulea University Of Tecnology. Suecia Agosto 2008
- 5.- **SEMINARIO INTERNACIONAL DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PRESAS.** Edición Asociación Peruana de Graduados en la URSS- Comité Peruano de Mecánica de Suelos, Fundación y Mecánica de Rocas. Lima 1987.
- 6.- **ROMANA RUIS MANUEL Y BERNAL RIOSALIDO ALBERT.** Fisuración y Erosión interna en Presas de Materiales Suelos. Revista Obras Públicas Dic. 1975-España.
- 7.- **VAZQUEZ BALLONA R. y ALVAREZ GRIMA M.** Piping phenomenon In Earth Dams: Case Histories. GEC International October 2008.