

Obras Hidráulicas 2025

Resolución de Trabajo Práctico nº 6

Ingeniería de Presas de Relleno

1) Para las imágenes que se detallan a continuación indicar cuál es el mecanismo y modo de falla de los rellenos.

a- Rebosamiento



Rebosamientos conducentes a lavado; limos menos cohesivos, arenas, etc. Tienen los mayores riesgos a corto plazo.

Rebosamiento y borde libre: El vertedero de excesos y la capacidad de desagüe deben ser suficientes para prevenir rebosamientos, con riesgo de erosión severa y posible lavado del relleno. El borde libre, es decir, la diferencia entre el nivel máximo del embalse y el nivel mínimo de la cresta de la presa, debe ser suficiente para prevenir rebosamientos por la acción de las olas. También debe incluir un margen para la sedimentación de largo plazo de la presa previsible en una cimentación compresible.

Características:

- Flujo sobre la presa y posible lavado
- Mayores riesgos en suelos menos cohesivos
- Más grave si es localizado.

Causas:

- Vertedero inadecuado y/o borde libre.
- El borde libre reducido por sedimentación, vertedero obstruido.

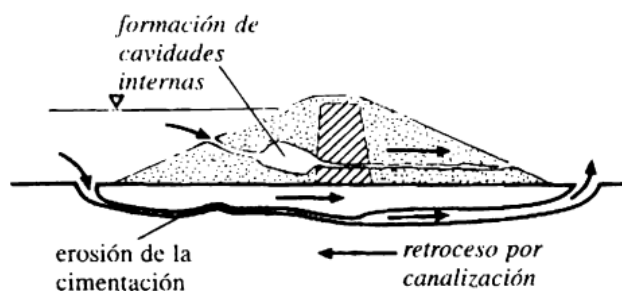
Medidas preventivas/correctivas:

- Capacidad del vertedero adecuada y borde libre inicial, y/o refuerzo de la superficie con vegetación.
- Restauración de la sedimentación de protección de la cresta, buen mantenimiento.

Además, puede ser causado por:

- *Altura de presa subdimensionada*
- *Subdimensionado del volumen muerto*
- *Asentamiento de la cimentación*
- *Mal cálculo del vertedero.*

Infiltración



Erosión interna y canalización con migración de finos del núcleo, etc. Nótese la regresión del “canal” y la formación de cavidades internas. Puede iniciarse por la formación de grietas internas o por infiltración a lo largo del perímetro de la alcantarilla, etc.

Control de infiltración: La infiltración dentro y debajo del relleno debe controlarse para prevenir la erosión interna oculta y la migración de materiales finos, por ejemplo, del núcleo, o la erosión externa y los desprendimientos. Los gradientes hidráulicos, la presión de infiltración y las velocidades de infiltración dentro y bajo la presa deben, por tanto, restringirse a niveles aceptables para los materiales del caso.

- Infiltración interna - Pérdida de agua

- Características:

Aumento en las pérdidas de infiltración y/o irregularidades de la superficie freática. Zonas blandas en taludes o aguas abajo.

- Causas:

Presa y/o cimentación permeable; rastrillo inadecuado. Agrietamiento interno.

- Medidas preventivas/correctivas:

Rastrillo e inyecciones en el núcleo. Diseño cuidadoso, inyecciones.

- Erosión de infiltración (erosión interna oculta)

- Características:

Infiltración turbia a través del sistema de drenaje.

- Causas:

Agrietamiento interno.

Infiltraciones a lo largo del perímetro de alcantarillas, túneles, tuberías, etc.

- Medidas preventivas/correctivas:

Drenaje interno, filtros, zonificación cuidadosa del relleno.

Diseño detallado, uso de collares, inyecciones.

Rebosamiento - Sedimentación



Sedimentación de la cimentación y el relleno (Deformación y agrietamiento interno). Nótese también los modos de deformación del valle transversal.

Inestabilidad (1):



Inestabilidad (1): la pendiente aguas abajo demasiado alta o demasiado fuerte en relación con la resistencia al corte del material del espaldón.

Estabilidad: El relleno, incluida su cimentación, debe ser estable bajo la construcción y en todas las condiciones de operación del embalse. Las pendientes de los paramentos deben ser, por tanto, suficientemente planas para asegurar que los esfuerzos internos y la cimentación permanezcan dentro de límites aceptables.

- Causas:

Pendiente demasiado empinada.

- Medidas preventivas/correctivas:

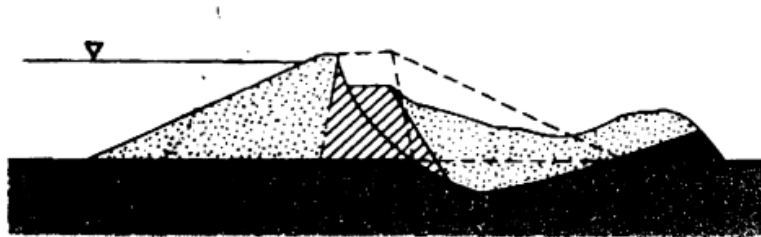
Tendido de pendientes o construcción de bermas estabilizadoras.

Inestabilidad (2):

Inestabilidad (2): falla del talud aguas arriba debido al rápido descenso del nivel de agua.



Inestabilidad (3):



Inestabilidad (3): falla de la cimentación aguas abajo debido a sobrefuerzos efectivos de capas blandas y débiles.

2) Buscar información acerca de fallas producidas en presas de materiales sueltos, para los sectores de cuenca estudiados por cada grupo.

- Detallar el mecanismo de falla;
- Establecer la causa que la provocó;
- Consignar si se tomaron medidas preventivas a fin de que la falla no ocurra;
- Detallar el daño provocado por la falla;
- Indicar si la presa continua en servicio, en forma total o parcial o fuera de servicio;
- Se tomaron medidas correctivas?

Misma cuenca que para Hidráulica aplicada

Resolución dependiendo de cada grupo.

3) Para las figuras detalladas, advertir las diferencias entre cada una en cuanto a la forma de plantear el control de infiltración a través de la cimentación

Los flujos y la presión de infiltración dentro de la cimentación se controlan mediante los rastrillos y el drenaje. Los rastrillos son barreras impermeables que funcionan como una extensión del núcleo del relleno dentro de la cimentación.

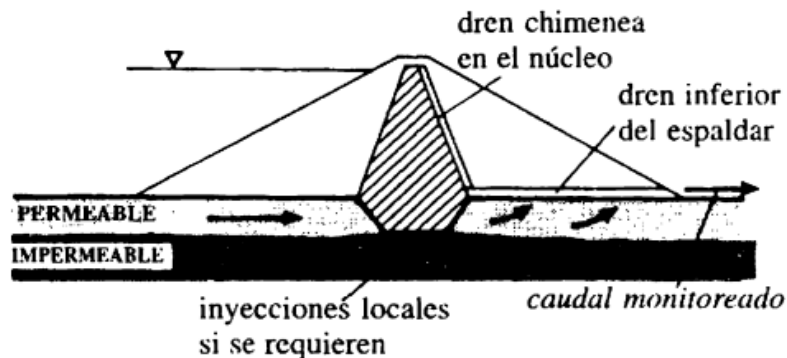
En general, se localizan bajo el núcleo, pero también pueden localizarse a una corta distancia aguas arriba y estar conectados al núcleo mediante una capa horizontal impermeable bajo el espaldón. El rastrillo puede penetrar el estrato impermeable (un rastrillo “que penetre totalmente”) o, si el material permeable se presenta a profundidades considerables, puede

terminar donde la pérdida de cabeza a través del rastrillo sea suficiente para efectuar el grado de control requerido (un rastrillo 'que penetre parcialmente').

Con frecuencia, los rastrillos más antiguos se construían como “zanjas rellenas de arcilla” muy angostas, con el inconveniente de que muchos eran vulnerables a daños por infiltración y erosión.

a) Rastrillo de zanja abierta

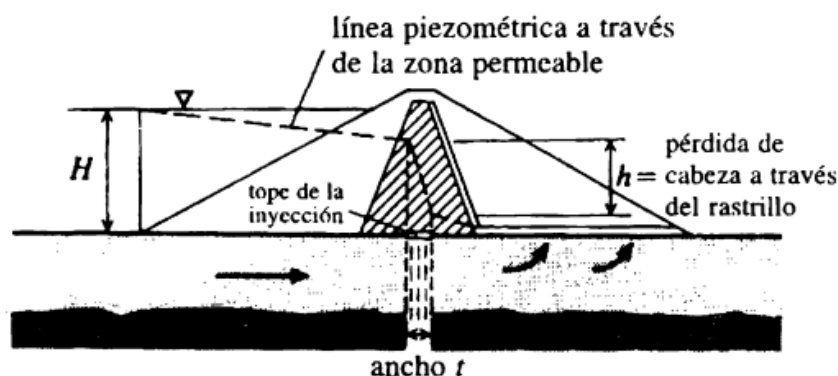
Solo a profundidades moderadas.



El rastrillo relativamente ancho y con zanjas poco profundas se rellena con arcilla compactada y forma la base del núcleo que está por encima. Es muy efectivo, en particular si se complementa con inyecciones, pero los costos de excavación lo limitan a profundidades máximas de zanja del orden de 10-20 m.

b) Rastrillo inyectado

No necesita penetrar capas impermeables.

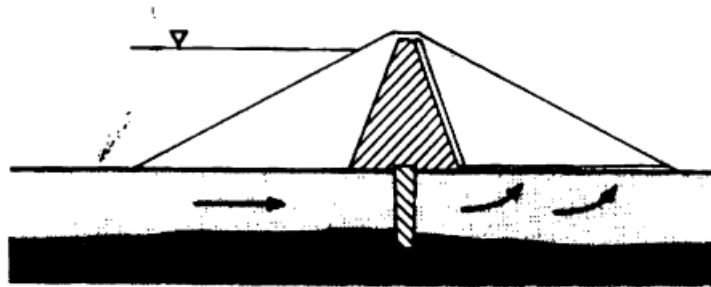


El rastrillo del tipo de zona inyectada se emplea en la actualidad para un rango amplio de condiciones de cimentación debido a los desarrollos en las técnicas de lechadas, por ejemplo, las técnicas de inyección en aluviones. El rastrillo se forma por varias líneas paralelas de agujeros de inyección alternadas, espaciadas de 2 a 3 m entre sus centros. En general, se utilizan lechada de base de cemento, pero hay disponibles lechadas químicas, más sofisticadas y costosas, para condiciones particularmente difíciles. Los rastrillos inyectados son más efectivos en roca fracturada y en suelos de grano más grueso, donde

puede reducir la permeabilidad entre uno a tres órdenes de magnitud. Rastrillos de este tipo se han construido hasta profundidades de más de 100 m. Pueden ser instalados o mejorados después perforando a través del cuerpo de una presa, pero de ordinario son relativamente costosos.

c) Rastrillo de diafragma

No necesita penetrar a capas impermeables



El rastrillo del tipo diafragma delgado, es resultado de los avances logrados en los procesos geotécnicos. El rastrillo se forma mediante la excavación, en longitudes de tramos de una zanja angosta estabilizada con lechadas que luego se rellenan de modo permanente con una mezcla de arcilla, arena y bentonita.

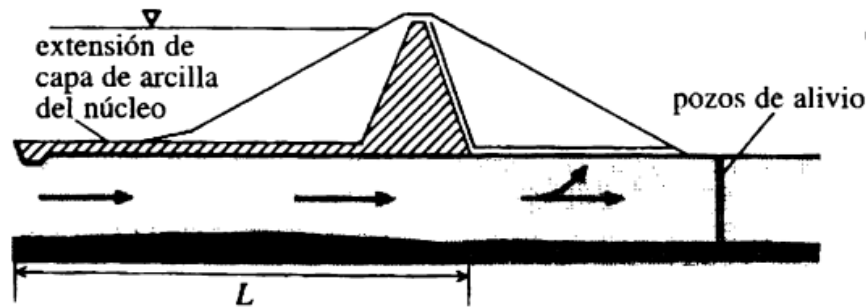
De forma alterna puede emplearse un relleno de concreto “plástico” relativamente débil y deformable para formar el elemento impermeable. El rastrillo de diafragma es muy efectivo en suelos de aluviones y de grano más fino y puede construirse de manera económica a profundidades de más de 30-40 m.

Muros de diafragma de tablestacado pueden dirigirse hasta profundidades de 20-25 m para formar un rastrillo bajo estructuras de cabeza baja. El costo de este tipo de rastrillo es moderado, pero su eficiencia es baja a menos que se complemente con inyecciones aguas arriba, por ejemplo, con una lechada de bentonita.

El control de la infiltración del rastrillo aguas abajo se favorece por la provisión casi universal de una capa de drenaje horizontal a nivel del terreno bajo el espaldón aguas abajo. A menudo se complementa con unos pozos profundos de alivio bajo o cerca del pie de presa.

d) Capa aguas arriba

Puede emplear drenes inferiores con pozos de alivio.



También se puede moderar la infiltración por medio de una continuación del núcleo aguas arriba mediante una capa horizontal impermeable que se extiende sobre el lecho del embalse. La capa se lleva aguas arriba a una distancia suficiente para alargar la trayectoria de infiltración y de esta manera reducir el flujo al nivel requerido. El espesor del relleno compactado requerido puede tomarse como $c=1.0+0.1H$, donde H (m) es la altura del relleno. La eficiencia de una capa aguas arriba puede ser relativamente baja con respecto a los considerables costos de construcción involucrados.

4) La figura de la presa ilustra el perfil de un relleno téreo, sobre el cual se tiene la siguiente información geotécnica:

- La permeabilidad (anisotrópica) del aluvión de cimentación es:

$$K_h = 4 K_v = 3,8 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$$

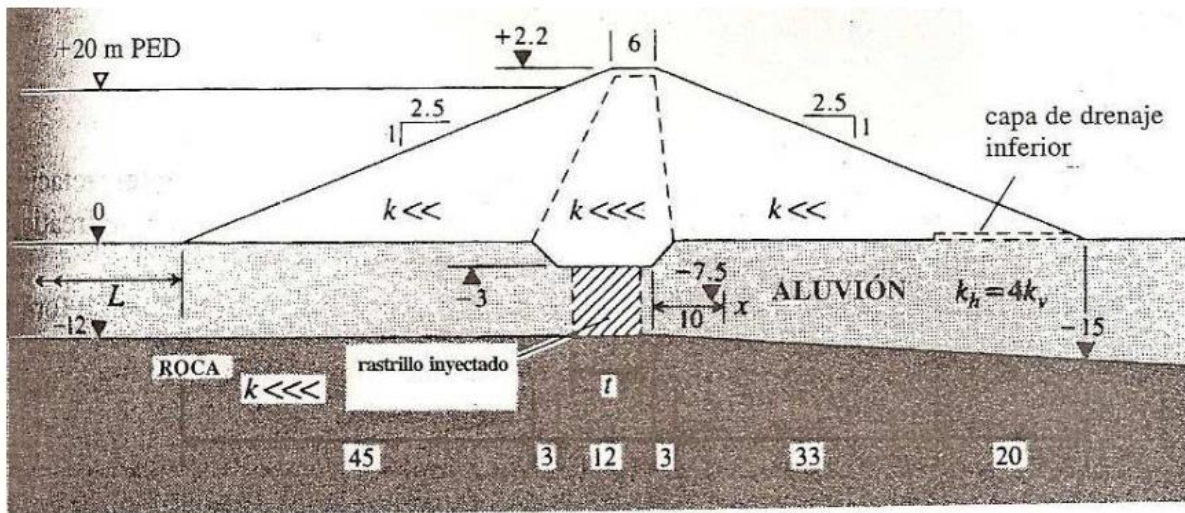
- La permeabilidad efectiva de diseño de la zona del rastrillo inyectado es:

$$K_c = 2.5 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$$

Se pide:

a - Dibujar la red de flujo de la cimentación sin ubicar el rastrillo inyectado en su sitio y calcular el caudal de infiltración " Q_0 " ($\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{dia}^{-1}$);

b - Si el rastrillo tiene un ancho $t = 12\text{m}$ la pérdida de carga a través del núcleo es $h = 14,50\text{m}$. Calcular la eficiencia de carga E_H y el caudal de infiltración " Q " con el rastrillo suponiendo que la eficiencia de flujo (E_Q) es del 70%.



Podemos obtener el caudal de infiltración en medios porosos utilizando la siguiente expresión:

$$Q = k \cdot \Delta h \cdot \frac{N_f}{N_d} \cdot n$$

Dónde:

- k : Coeficiente de permeabilidad del manto permeable (isotrópico).
- Δh : Diferencia entre niveles de aguas arriba y aguas abajo.
- N_f : Número de canales de Flujo.
- N_d : Números de caídas de potencial.
- $n: \frac{N_f}{N_d}$ = Factor de forma de la red de flujo

Relación de lados de la red de flujo (si adoptamos cuadrados vale 1).

La permeabilidad del aluvión de cimentación es anisotrópica, esto quiere decir que la permeabilidad varía según la dirección que se esté analizando. Para resolver el problema se debe analizar como un medio isótropo, por ende, se debe modificar la escala de dibujo.

Si $K_h = 4 \cdot K_v = 3,8 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Entonces $K_v = 0,95 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

λ : Factor de transformación de escala horizontal

Para suelos anisotrópicos, con coeficiente de permeabilidad horizontal $k_h > k_v$, se tiene:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} = \sqrt{\frac{3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/seg}}{0,95 \cdot 10^{-5} \text{ m/seg}}} = 2$$

La escala horizontal se relaciona con la vertical de la siguiente manera:

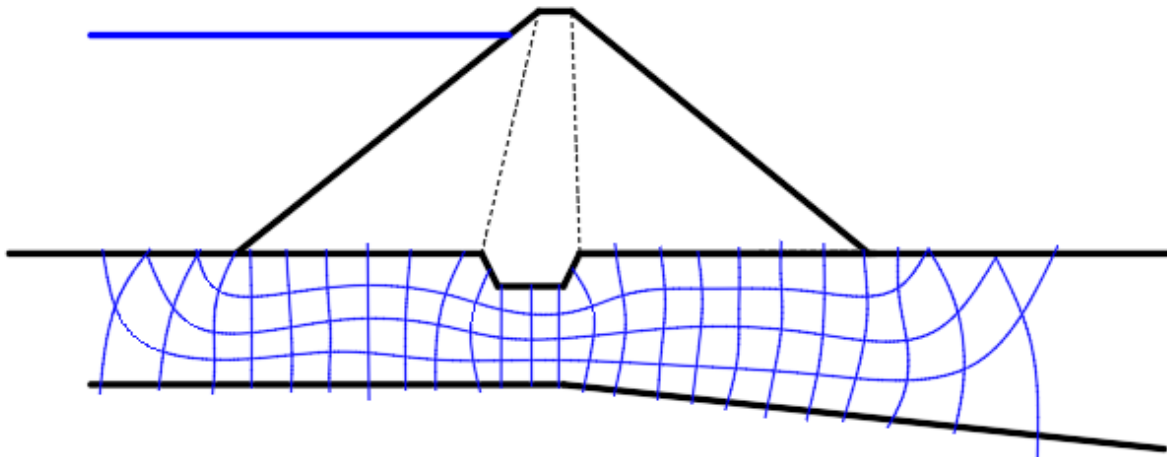
$$EV = EH \cdot \lambda = 1 \cdot 2$$

$$EV = EH \cdot 2$$

Ahora bien, el valor de la “Permeabilidad efectiva (k')” para el medio considerándolo como isotrópico está dado por:

$$k' = \sqrt{k_v \cdot k_h} = \sqrt{(0,95 \cdot 10^{-5} \text{ m/seg}) \cdot (3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/seg})} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/seg}$$

➤ **Sin rastrillo**



$N_f = 4$ (número de canales de flujo)

$N_d = 24$ (número de espacios equipotenciales)

$$Q_o = \sqrt{k_H \cdot k_V} \cdot \Delta h \cdot \frac{N_f}{N_d} \cdot n = (1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/seg}) \cdot 20 \text{ m} \cdot \frac{4}{24} \cdot 1 \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 3600 \frac{\text{seg}}{\text{h}}$$

Δh : Dato. Ver gráfico de la consigna.

$$Q_o = 5,47 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{día}$$

➤ **Con rastrillo**

Calculamos la Eficiencia del Núcleo (Eficiencia de Cabeza) como:

$$E_h = \frac{\Delta h}{H} = \frac{14,5 \text{ m}}{20 \text{ m}} \rightarrow E_h = 0,725$$

Dónde:

- Δh = pérdida de la cabeza a través del núcleo o del rastrillo. Dato de consigna.
- H = cabeza total diferencial.

E_h puede estimarse por los niveles piezométricos aguas arriba y aguas abajo del núcleo o rastrillo.

La Eficiencia de flujo según consigna es del 70%:

$$E_q = 1 - \frac{Q}{Q_o} = 1 - \frac{Q}{Q_o} = 0,7$$

E_q puede estimarse de las medidas de los caudales.

Dónde:

- Q = Caudal de infiltración con el rastrillo
- Q_o = Caudal de infiltración sin el rastrillo

Entonces despejando, el caudal con el rastrillo es igual a:

$$1 - 0,7 = \frac{Q}{Q_o}$$

$$Q = (1 - 0,7) \cdot Q_o = (0,3) \cdot Q_o$$

$$Q = 0,3 \cdot 5,47 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{día}$$

$$\mathbf{Q = 1,64 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{día}}$$