

## Capítulo 15

# Contorno subterráneo de las presas de hormigón cimentadas en suelo

### 15.1. Aspectos generales

Como se ha definido el contorno subterráneo de una presa de hormigón cimentada en suelo es la línea que limita desde abajo los elementos impermeables y poco permeables de la presa que están en contacto directo con el suelo de cimentación (línea 1-2-3-a-4-5-b-6, en la Figura 15.1).

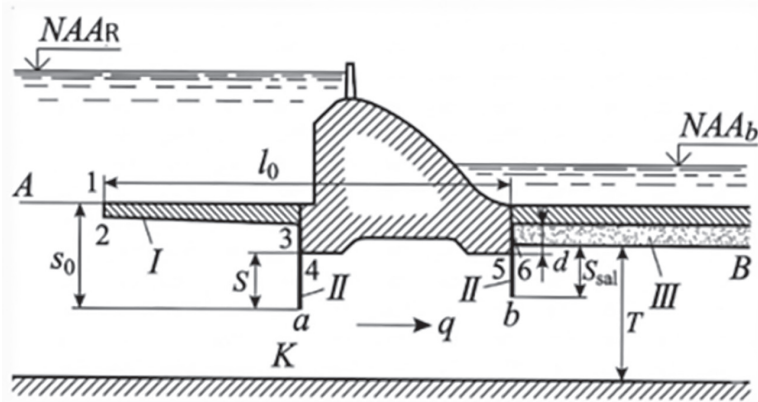


Figura 15.1. Carpeta y presa sin drenaje horizontal (esquema A).

A-1 y 6-B- sección de entrada y sección de salida, respectivamente; I- carpeta; II- tableta; III- filtro invertido.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

En consecuencia, el contorno subterráneo de la presa está en contacto directo con el suelo de cimentación y para su diseño deben ser considerados los efectos de dicho contacto:

- Surge subpresión bajo el contorno subterráneo.
- Se producen fugas de agua desde el tramo aguas arriba hacia el tramo aguas abajo.
- El flujo de filtración puede superar la resistencia a la filtración del suelo de cimentación originando una más de las deformaciones por filtración conocidas.

El diseño del contorno subterráneo involucra ante todo la selección de un contorno que satisfaga las condiciones de funcionalidad, confiabilidad, resistencia y estabilidad al menor costo. En consecuencia, para este diseño se requiere también el planteamiento y comparación de alternativas. Para el efecto se procede de la siguiente manera:

- Para las condiciones concretas se adopta un esquema compatible del contorno subterráneo. Los esquemas referenciales serán presentados más abajo.
- Para el esquema adoptado, sobre la base de análisis previos se formulan una serie de alternativas, equivalentes en relación con la resistencia mecánica, estabilidad y resistencia a la filtración.
- Las variantes planteadas son comparadas desde el punto de vista económico para seleccionar la alternativa económicamente más favorable.

## **15.2. Esquemas de contorno subterráneo**

### ***15.2.1. Esquema sin drenaje horizontal bajo la presa***

La característica fundamental del esquema “A” es la ausencia de drenaje horizontal bajo la presa. La sección de entrada del flujo de filtración es la superficie del fondo aguas arriba del cauce A-1; la superficie de salida es la superficie del fondo del cauce aguas abajo 6-B, generalmente cubierto en la parte superior, bajo la losa de disipación, con drenaje horizontal y filtro invertido. Este esquema cabe adoptar exclusivamen-

te cuando existe el riesgo de obstrucción del filtro invertido, ubicado bajo el drenaje horizontal, es decir cuando el suelo de cimentación está constituido por suelos finos no cohesionados como limos arenosos sin contenido de arcilla, arenas finas. En otros casos este esquema no debe ser adoptado.

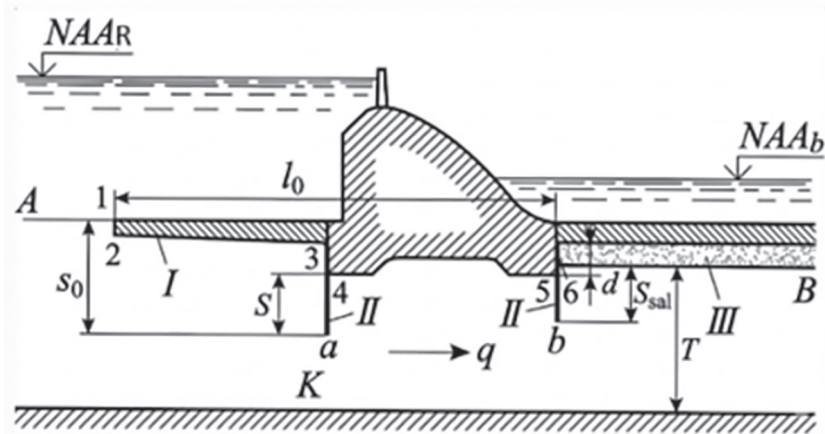


Figura 15.2. Carpeta y presa sin drenaje horizontal (esquema A).

A-1 y 6-B- sección de entrada y sección de salida, respectivamente; I- carpeta; II- tablestaca; III- filtro invertido.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

### 15.2.2. Esquema con drenaje horizontal bajo la presa

La característica fundamental de este esquema es la presencia de drenaje horizontal bajo la presa. Se adopta en todos los casos a excepción de los casos correspondientes al esquema anterior (esquema A).

En este esquema, bajo la presa y bajo el dentellón aguas abajo la carga es prácticamente la misma y corresponde al nivel de agua aguas abajo. Gracias a la inclusión del drenaje horizontal bajo la presa de buena parte de su base se elimina en gran medida la subpresión excedente; por esta razón resulta factible disminuir el peso de la presa.



por otros medios origina un considerable incremento de costos. La carpeta rígida anclada al cuerpo de la presa permite mejorar las condiciones de estabilidad al deslizamiento, gracias a la incorporación del peso del agua ubicada sobre la carpeta rígida a las fuerzas normales actuantes. Desde la perspectiva de diseño, una presa con carpeta anclada es de mayor complejidad que una presa sin este tipo de carpeta, debido al estado tensional con cierto grado de indefinición, no solo de la carpeta sino también del paramento aguas arriba de la presa.

#### 15.2.4. Esquema con drenaje vertical del suelo de cimentación

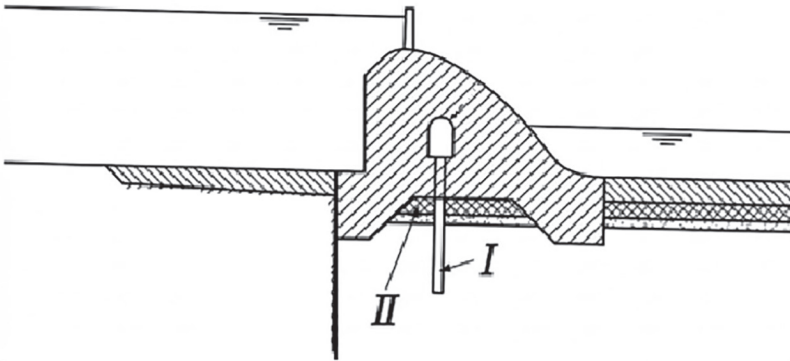


Figura 15.5. Presa con drenaje vertical [Esquema D].

I- fila de pozos de drenaje; II- filtro invertido.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGROPROMIZDAT.

En este caso, uno de los esquemas anteriores adquiere mayor complejidad debido a la inclusión de una o más filas de drenes verticales profundos (pozos) ubicados bajo la presa. En este esquema la sección de salida del flujo de filtración se amplía gracias a la presencia de los drenes verticales, con la particularidad que la carga en alguna zona del suelo de cimentación (en la superficie perimetral de los drenes verticales y en su fondo) es igual a la carga aguas abajo de la presa.

Este esquema se adopta en los siguientes casos:

- Cuando el suelo de cimentación está atravesado por una capa de material con bajos indicadores de corte, en cuyo caso el drenaje vertical debe atravesar dicho estrato.
- Cuando la presa está cimentada sobre una capa delgada de material de apoyo permeable.
- Cuando el suelo de cimentación es anisotrópico respecto a la permeabilidad, siendo esta menor en sentido vertical.

### 15.2.5. Esquema profundo del contorno subterráneo

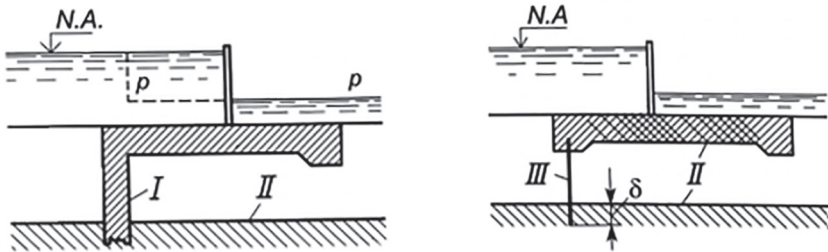


Figura 15.6. Esquema profundo del contorno subterráneo (esquema E).

I- dentellón; II- superficie impermeable; III- tablestaca; P-P- línea piezométrica.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

En este caso la capa permeable del suelo de cimentación en todo su espesor hasta el nivel impermeable está atravesada por un diafragma formado o por un dentellón de hormigón o por una cortina de pilotes; la capa permeable puede ser atravesada por uno o por varios diafragmas.

El esquema profundo del contorno subterráneo se adopta en los casos cuando el nivel impermeable se ubica a una profundidad relativamente pequeña (hasta 15 a 20 metros). De hecho, como en cualquier otro caso, el esquema se adopta luego de ser comparado desde el punto de vista económico con otro u otros esquemas. Debido a que la capa permeable es atravesada en todo su espesor por el diafragma, el flujo de filtración bajo la presa se elimina, a la vez que la carga antes del diafrag-

ma corresponde a la profundidad aguas arriba, en tanto que la carga luego del diafragma corresponde a la profundidad aguas abajo (ver la línea piezométrica P-P). Cuando la capa permeable del suelo de cimentación es atravesada por una cortina de pilotes, debido a la conocida separación entre ellos, se presenta algún flujo de filtración bajo la presa, como resultado de lo que la presión antes de la cortina disminuye, en tanto que a continuación de la cortina se incrementa.

### **15.3. Principales elementos constructivos de la parte subterránea de la presa**

Se distinguen los siguientes elementos constructivos del contorno subterráneo: carpeta, filas de tablestacas piloteadas, dentellones de hormigón (profundos y pequeños) y base de la presa.

El contorno subterráneo normalmente no se desarrolla a través de la losa de disipación ubicada al pie de la presa y separada de esta por una junta de deformación. Bajo dicha losa es necesario incluir drenaje horizontal protegido desde abajo por un filtro invertido. La inclusión del contorno de la losa en el contorno subterráneo de la presa originaría el incremento de la subpresión bajo la presa lo que es indeseable.

El desarrollo del contorno subterráneo hasta que su longitud sea la necesaria, es decir, la establecida tomando en cuenta la resistencia a la filtración (ver apartado 14.6), normalmente cabe realizarlo con cargo al aumento de la longitud de la carpeta, de las tablestacas o de los dentellones de hormigón, al inicio de la presa aguas arriba.

#### **15.3.1. Carpeta**

La carpeta se incluye con el fin de aumentar la longitud del contorno subterráneo y, consecuentemente, disminuir el caudal de filtración, la subpresión (en el caso del esquema A) y las gradientes de carga en el suelo de cimentación. En algunos casos la carpeta no solo tiene solo el rol impermeabilizante, sino también protector del fondo del cau-

ce aguas arriba evitando su erosión por acción del flujo superficial que se acerca a los orificios de la presa.

Cabe distinguir las carpetas rígidas y las flexibles que se deforman en correspondencia con las deformaciones del suelo de cimentación. En el caso de las carpetas flexibles no es posible la formación de una abertura (espacio) entre la carpeta y el suelo de cimentación. Además, cabe distinguir: las *carpetas prácticamente impermeables* de construcción especial, por ejemplo, carpetas con aislamiento asfáltico; estas carpetas pueden ser tanto rígidas como flexibles y las *carpetas poco permeables* ejecutadas de suelo arcilloso; estas carpetas siempre son flexibles.

En el caso de suelo de cimentación arcilloso la implantación de una carpeta poco permeable sobre este, no es razonable. Este tipo de carpetas cabe adoptar únicamente en los casos de suelos de cimentación arenosos. El coeficiente de filtración de una carpeta poco permeable debe ser menor al del suelo de cimentación en no menos de cien veces. En caso de que esta relación no sea posible lograr entonces cabe optar por carpetas prácticamente impermeables.

Al diseñar una carpeta de uno u otro tipo se consideran los siguientes elementos de juicio:

- La superficie de una carpeta arcillosa normalmente debe estar cubierta por losas de hormigón u otro revestimiento protector. La superficie de una carpeta arcillosa debe ser cubierta con una capa de arena de 20 cm de espesor.
- La losa de hormigón u otro revestimiento que forma parte de la carpeta no debe ser colocada directamente sobre la parte arcillosa de la carpeta. Bajo este revestimiento debe colocarse una capa de una mezcla arena-grava de 20 centímetros de espesor.
- La cobertura de asfalto que forma parte de las carpetas impermeables y que se ubica inmediatamente sobre el suelo de cimentación cabe colocarla sobre suelo seco.
- La superficie de la cimentación arcillosa de una carpeta al ser expuesta (luego de la excavación) debe ser cubierta por el material de la carpeta en un tiempo suficientemente corto.

- Durante el proceso constructivo, la carpeta puede ser erosionada por el flujo de agua, así como también exponerse a la acción del déficit de presión, como consecuencia, puede tener lugar una deformación de desplazamiento local de una parte de la carpeta. Además, durante el proceso constructivo, la superficie de la carpeta puede estar expuesta a la acción de los mecanismos de transporte.
- La carpeta (en caso de no ser anclada) está expuesta únicamente a la presión vertical del agua desde arriba, en cambio la presa soporta la acción de fuerzas horizontales con dirección hacia aguas abajo. Por acción de estas fuerzas tiene lugar alguna deformación de corte de la presa en dirección hacia aguas abajo; en este caso la junta de enlace de la carpeta con la presa tiende a abrirse lo que no se debe permitir.

Las carpetas poco permeables (arcillosas) se diseñan de acuerdo con los esquemas mostrados en la Figura 15.7. El espesor mínimo de la carpeta en su comienzo se adopta igual a  $t_{min} = 0,5 \text{ m}$  (Figura 15.7, a); los coeficientes de los taludes constructivos  $m_1$  y  $m_2$  son adoptados en correspondencia con las propiedades del suelo de cimentación (para obtener un talud estable hasta la implantación de la carpeta). El espesor  $t$  de una carpeta poco permeable (en una sección vertical dada) se adopta de acuerdo con la relación  $t \geq \left(\frac{1}{10} \text{ a } \frac{1}{15}\right) h_{car}$ , donde  $h_{car}$  es la pérdida de carga desde el comienzo del contorno subterráneo (desde aguas arriba) hasta la sección vertical considerada. La junta (o parte de ella) de enlace del suelo arcilloso y el cuerpo de la presa se hace inclinado con el fin de que en caso de asentamiento del material arcilloso y en caso de desplazamiento horizontal de la presa la carpeta, se apegue al cuerpo de la presa (Figura 15.7b). En algunos casos esta junta es especialmente sellada.

De conformidad con las investigaciones de algunos autores, la longitud de una carpeta impermeable  $l_{car}$  debe ser menor a determinada longitud límite  $l_{car} < l_{car.lim}$ .

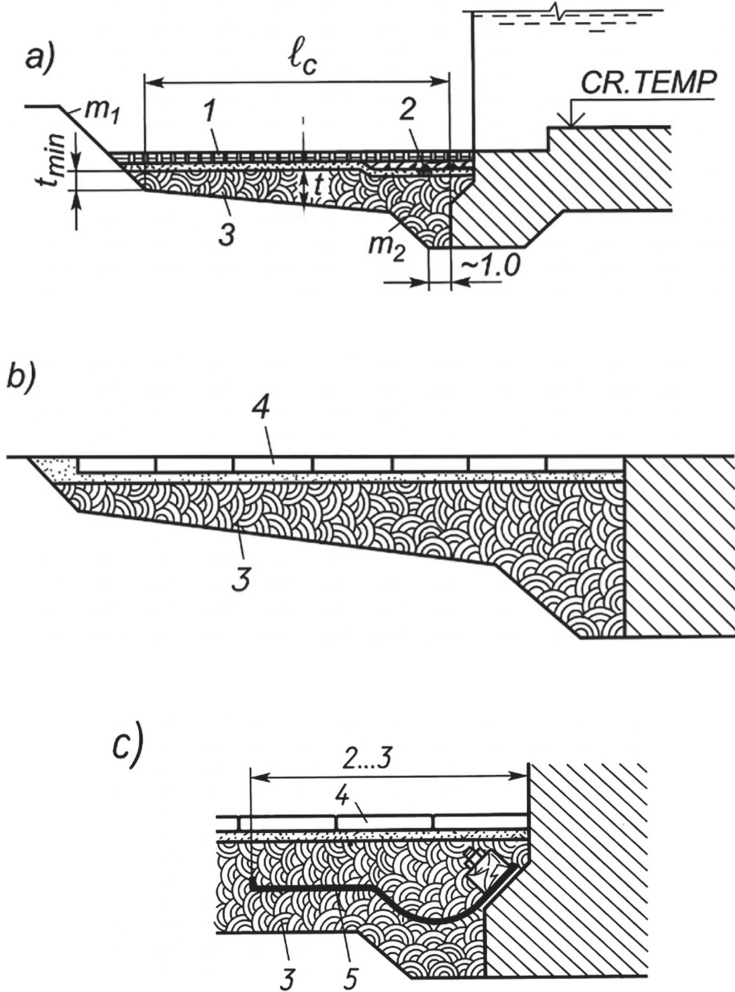


Figura 15.7. Ejemplos de carpetas flexibles poco permeables [arcillosas: dim. en m].  
 1- revestimiento protector simple sobre una capa grava-arena de espesor 0,15 m; 2- revestimiento protector doble sobre la capa grava-arena; 3- carpeta arcillosa; 4- losas de hormigón 3,0 x 3,0 x 0,5 m sobre una capa de grava de espesor 0,15 m; 5- bitumen.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

$$l_{car.lim} = 2 \sqrt{\frac{k_{cim}}{k_c} t T_c} \tag{14.1}$$

Donde:

$k_{cim}$  y  $k_c$ : coeficientes de filtración del suelo de cimentación y de la carpeta.  
 $t$ : espesor medio de la carpeta.

$T_c$ : profundización de la superficie de la capa impermeable por debajo de la base de la carpeta.

La pregunta sobre la longitud límite de la carpeta  $l_{car.lim}$  puede ser aclarada con ayuda del esquema mostrado en Figura 15.8, donde con el símbolo  $q$  se representa el caudal de filtración bajo la presa que determina la subpresión y la gradiente de carga en el espacio de cimentación de la presa e igual a:

$$q = q_1 + q_2 \tag{14.2}$$

Donde:

$q_1$ : caudal de agua que filtra a través de la carpeta de longitud  $l_{car}$ .  
 $q_2$ : caudal de agua que filtra a través del fondo aguas arriba, fuera de los límites de la carpeta.

Con el incremento de  $l_{car}$  se incrementa  $q_1$  tendiendo al límite  $q_{lim}$ ; en este caso, disminuye  $q_2$ , tendiendo a cero;  $q$  también disminuye hacia a  $q_{lim}$ .

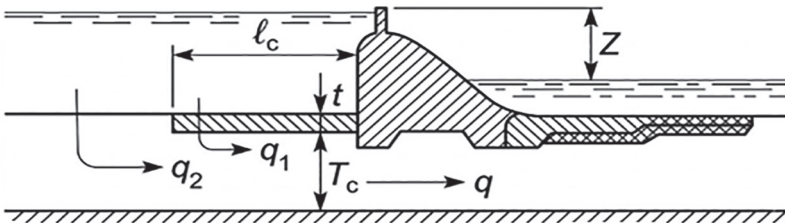


Figura 15.8. Para aclarar la longitud límite de una carpeta.  
 Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

Ha sido demostrado que cuando:

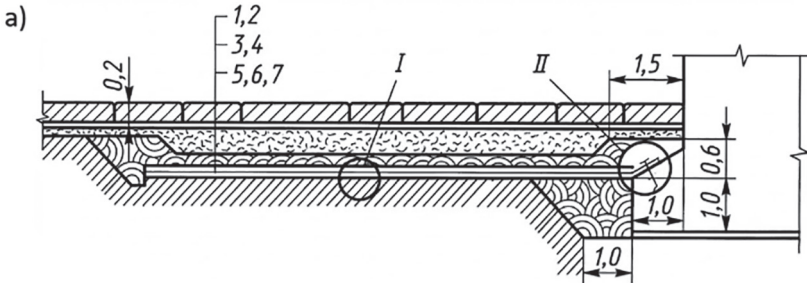
$$q_2 \approx 0 \tag{14.3}$$

Entonces:

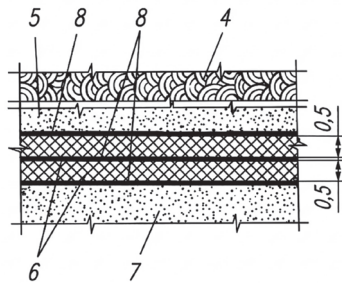
$$q \approx q_1 \approx q_{lim} \tag{14.4}$$

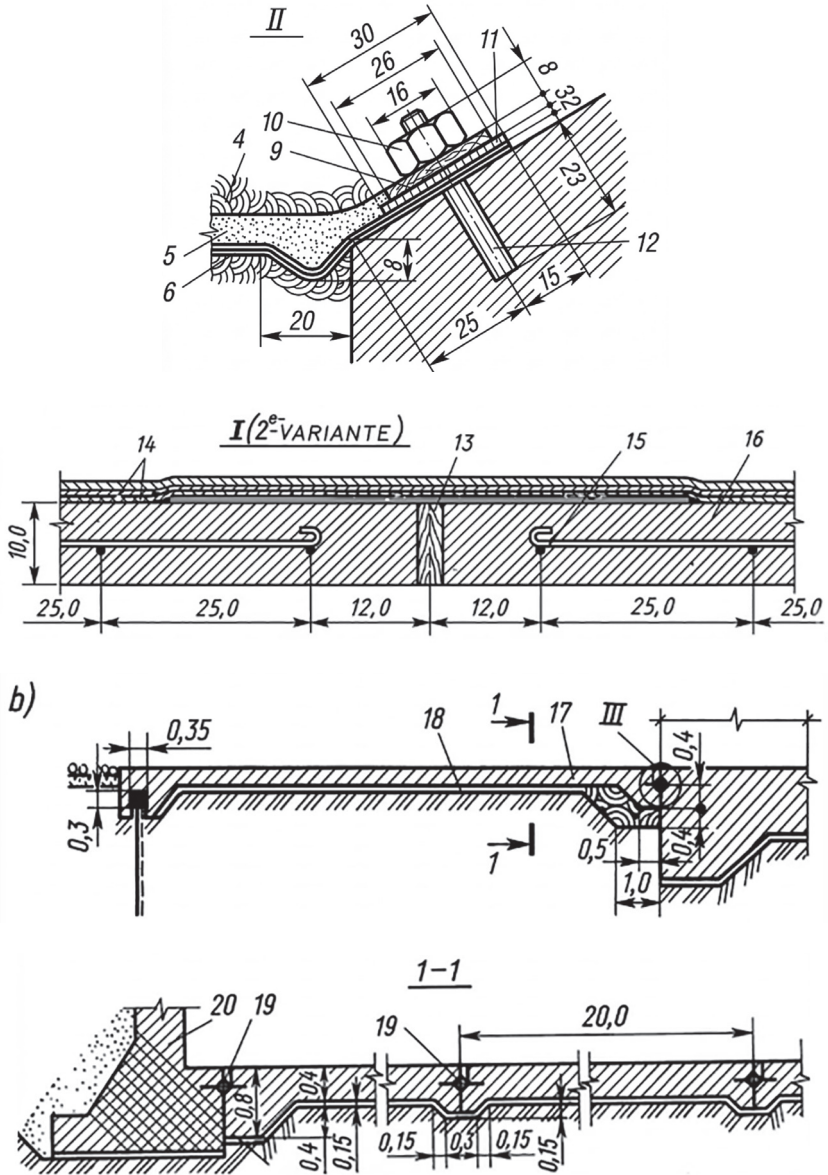
Un subsiguiente incremento de  $l_{car}$  no tiene sentido por cuanto en este caso el caudal de filtración bajo la presa  $q$  prácticamente no disminuye.

En lo que tiene que ver con las carpetas prácticamente impermeables hay muchas y diferentes soluciones constructivas de dichas carpetas (Figura 15.9). En este caso con frecuencia tienen preferencia las carpetas flexibles.



*I (1-e VARIANT)*







- Protege el suelo de cimentación frente a la erosión por acción del flujo superficial (la tablestaca ubicada aguas abajo).
- Obstaculizan el desplazamiento local del suelo de cimentación ubicado bajo la presa, que podría producirse debido a la acción del peso de esta.
- Permiten realizar el enlace del cuerpo de la presa con el nivel impermeable del suelo de cimentación y obtener, como resultado, el esquema profundo de contorno subterráneo (esquema E, Figura 15.6).

La implantación de una tablestaca aguas abajo (5-6-6, Figura 15.1) origina el incremento de la subpresión bajo la presa. Para evitar esto dicha tablestaca debe ser construida con perforaciones. Las tablestacas perforadas no deben ser consideradas en los cálculos hidráulicos.

En los suelos arenosos que permitan hincar pilotes, en los esquemas A y B (Figura 15.1 y 15.2) generalmente se incluye una tablestaca bajo la presa, aguas arriba. Una tablestaca (o dentellón) bajo el extremo aguas arriba de la carpeta es necesario adoptar en el caso de carpeta rígida. En el caso de carpeta poco permeable no cabe incluir la tablestaca bajo la carpeta.

En el caso del esquema A (Figura 15.1) la tablestaca no perforada (o dentellón), bajo el extremo aguas abajo de la presa, normalmente debe ser implantada hasta la profundidad  $s_{sal} = (0,05 \text{ a } 0,10)T$ , pero no mayor a  $s_{sal} = (0,05 \text{ a } 0,10)l_o$ .

Donde:

$T$ : profundidad a la que se encuentra la superficie de la capa impermeable.  
 $l_o$ : longitud de la proyección horizontal del contorno subterráneo.

En caso de que  $s_{sal}$  sea adoptado de menor magnitud a la obtenida a partir de las fórmulas del párrafo anterior, la gradiente piezométrica de salida (en el punto 6 de la Figura 15.1) aumentaría bruscamente, llegando hasta infinito en caso de que  $s_{sal} = 0$ , hecho que es indeseable desde el punto de vista de la operación del filtro invertido que cubre el

fondo aguas abajo. Estas condiciones podrían considerarse aceptables únicamente en el caso cuando la tablestaca (o el dentellón de aguas abajo) resulte costoso.

Para implantar una u otra tablestaca no cabe adoptar profundidades demasiado pequeñas (menor a 2 o 3 m), puesto que en este caso la organización de los trabajos para hincar la fila de pilotes poco profundos resultaría económicamente desfavorable.

En el caso de que el macizo de cimentación sea heterogéneo con subcapas horizontales impermeables las tablestacas deben en lo posible atravesarlas.

Cuando bajo la presa se ubiquen tablestacas “colgantes” (que no llegan hasta la capa impermeable) cabe tender a que la distancia entre ellas sea no menor a  $2s$ , donde  $s$  es la profundidad de hincado de la tablestaca. En casos excepcionales la distancia entre tablestacas “colgantes” se puede permitir hasta  $(1,5 \text{ a } 1,0)s$ .

En los casos de macizos de cimentación homogéneos e isotrópicos, cuando  $s \leq (0,4 \text{ a } 0,5)T$  y  $s \leq (0,2 \text{ a } 0,25)l_o$ , se puede considerar que un metro de longitud de carpeta es equivalente respecto a la disipación de carga (en el sector posterior a la tablestaca ubicada bajo el paramento aguas arriba de la presa) a 0,5 metros de longitud de la tablestaca. Al respecto, como criterio general se puede afirmar que el efecto disipador de un metro de longitud de un elemento longitudinal del contorno subterráneo es equivalente al efecto disipador de 0,5 metros de profundidad de un elemento vertical de dicho contorno.

Al implantar filas de tablestacas en la base de una presa es necesario tomar en cuenta su permeabilidad que surge debido a la insuficiente compactación de los enlaces entre los pilotes que conforman la tablestaca. Durante la ejecución de los trabajos de hincado de una tablestaca en el suelo es necesario tomar medidas a fin de que los espacios o grietas entre los pilotes sean mínimos. No se debe hincar paquetes de pilotes sin previa compactación de los espacios entre pilotes. La falta de suelo en

los enlaces entre pilotes, que no han sido suficientemente compactados en una tablestaca disminuye fuertemente el efecto impermeabilizante de la tablestaca.

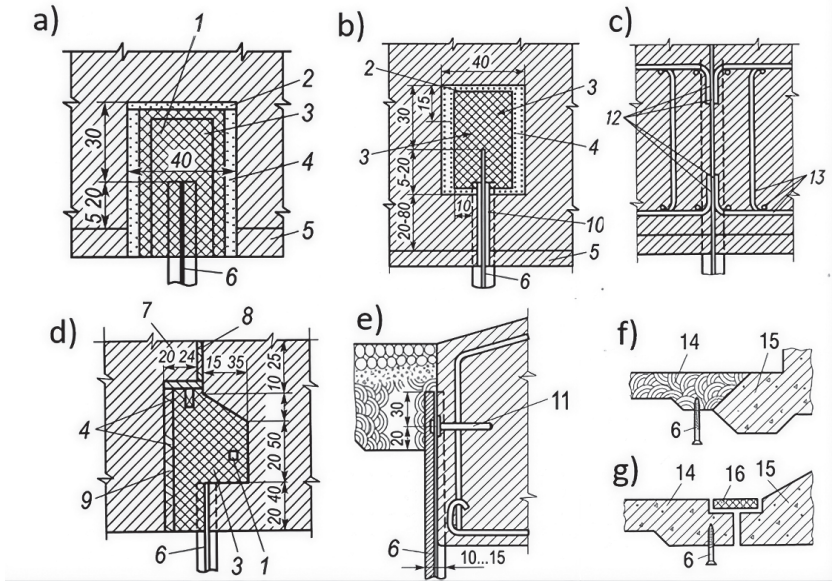


Figura 15.10. Ejemplos de enlace de una tablestaca con el cuerpo de una presa de hormigón (dimensiones en centímetros).

1- tubo para calentar el bitumen; 2- capas de bitumen del encofrado; 3- mezcla bituminosa; 4- encofrado; 5- base de hormigón; 6- tablestaca metálica; 7- hormigón; 8- capas de bitumen en la junta; 9- amarres metálicos del encofrado; 10- fieltro de alquitrán; 11- anclaje ( $l \geq 30 \text{ cm}$ ); 12- soldadura; 13- armado; 14- carpeta; 15- cuerpo de la presa; 16- sellado de junta.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

Para el diseño de los enlaces de las tablestacas con los elementos de hormigón de la presa cabe prever las condiciones constructivas necesarias a fin de que no se transmitan las fuerzas verticales desde el cuerpo de la presa a la tablestaca.

Por sus características constructivas, las filas de tablestacas se dividen en: *metálicas*, en correspondencia con perfiles comerciales de los pilotes metálicos, la longitud límite de estos pilotes generalmente es del orden de 20 a 25 m, utilizando la soldadura de las unidades de pilotes existentes la profundidad de una tablestaca —en caso de condiciones geomecánicas favorables— puede llegar por ejemplo hasta 50 m; de *madera* con longitud de 3 a 5 metros y de *hormigón armado*.

### 15.3.3. *Dentellones de hormigón*

Los dentellones poco profundos de hormigón se implantan para interceptar la peligrosa filtración de contacto, en tanto que los profundos se adoptan en lugar de las tablestacas con filas de pilotes, cuando el suelo de cimentación no permite el hincado de pilotes o en los casos de estructuras especialmente importantes.

Generalmente por norma cabe implantar el dentellón bajo el paramento aguas arriba de la presa (poco profundo o profundo). El dentellón al pie del paramento aguas abajo en los esquemas B y D (Figura 15.2 y 15.5) se incluye con el fin de aislar del tramo aguas abajo el drenaje bajo la presa y con el fin de tener la posibilidad de bombear el agua desde este drenaje. El bombeo del agua desde el drenaje bajo la presa puede ser necesario, por ejemplo, con el fin de controlar la operación del drenaje.

En el caso del esquema profundo (Figura 15.6, a) posibilitado por un dentellón profundo aguas arriba (el mismo que puede llegar hasta el nivel impermeable), es necesario tener orificios de filtración en el dentellón profundo aguas abajo (que también puede llegar hasta el nivel impermeable) o en la losa de disipación a fin de asegurar que la carga al pie de la presa corresponda al nivel de agua en el tramo aguas abajo.

Los dentellones de hormigón pueden ser contruidos: en excavaciones abiertas drenadas, con el método de hormigonado bajo nivel de agua o utilizando pozos de cimentación o *caissons*. Para evitar la peligrosa filtración de contacto el último esquema es permisible única-

mente en el caso del esquema profundo (Figura 15.6a), tomar en cuenta que es necesaria una cuidadosa compactación de calidad en los espacios entre los pozos de cimentación (o entre los *caissons*). El hormigonado bajo agua de los dentellones debe ejecutarse en correspondencia con las normas de este tipo de trabajos con el fin de obtener un enlace de calidad del hormigón con el suelo de cimentación.

En las excavaciones abiertas drenadas la construcción de los dentellones puede ser ejecutada, en particular, por uno de los siguientes tres esquemas:

- La excavación es realizada sin utilizar protecciones, con taludes permisibles para el tipo de suelo dado y totalmente se llena el espacio con la mezcla de hormigón que conforma el dentellón.
- La excavación se realiza con paredes verticales que tengan la correspondiente protección, la misma que es retirada (empezando desde abajo) conforme avanza el hormigonado del dentellón. En este caso las paredes laterales del dentellón se obtienen verticales.
- La excavación se ejecuta con los taludes permisibles para el suelo dado; el ancho inferior de la excavación se ejecuta algo mayor que el ancho inferior del dentellón (por ejemplo, un metro más).

En la excavación se ejecuta el encofrado dentro de cuyos límites se hormigona el dentellón. Una vez retirado el encofrado, el espacio vacío que queda de la excavación se rellena, sea con mezcla de hormigón (correspondiente a hormigón pobre), sea con hormigón arcilloso bien compactado; en caso de ser necesario disminuir costos se utiliza arcilla o limo arcilloso bien compactado. En este caso una exclusión es únicamente el relleno ubicado bajo el cuerpo de la presa que tiene drenaje horizontal bajo su base (relleno 5 en la Figura 15.11); este relleno es necesario realizar con suelo altamente compactado y que tenga coeficiente de filtración igual al del suelo de cimentación.

En el diseño de un dentellón utilizando este esquema es necesario tomar en cuenta que en el caso de insuficiente compactación del suelo que rellena los espacios de la excavación, se presentarán asentamientos de dicho suelo, hecho que originaría deformaciones indeseables del drenaje horizontal bajo la presa o, en caso de ausencia de este drenaje, a lo largo del contorno subterráneo se abriría un indeseable camino de filtración. En el diseño del dentellón por este esquema también es necesario tender a que durante el proceso de operación de la presa, tenga lugar la mayor compresión posible del suelo que rellena la excavación hacia las paredes laterales del dentellón. En la mayoría de los casos el asentamiento del dentellón que soporta desde arriba el peso de la presa, debe ser mayor que el asentamiento del suelo que rellena la excavación, por esta razón cabe dar a las paredes laterales del dentellón una pendiente, por ejemplo 10:1, a fin de que el ancho del dentellón hacia su base disminuya.

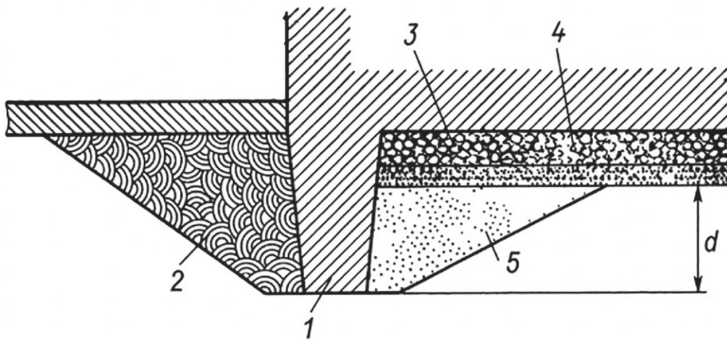


Figura 15.11. Implantación del dentellón en la presa.

1- dentellón; 2- hormigón arcilloso; 3- drenaje; 4- filtro invertido; 5- relleno (ejecutado con suelo cuidadosamente compactado).

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGROPROMIZDAT.

En lo que respecta a la profundidad de los dentellones colgantes, ejecutados por uno de los tres esquemas anteriormente identificados, dicha profundidad, de igual manera que la profundidad de las tablestacas, debe ser determinada sobre la base de los cálculos de la resistencia a la filtración del suelo de cimentación (ver apartado 15.6).

### 15.3.4. Base de la presa

La profundización de la base de la presa en el macizo de cimentación es necesario determinar tomando en cuenta tanto los cálculos de filtración como los estáticos de la presa. Para incrementar la estabilidad de la presa su base debe ser implantada en lo posible en un macizo natural resistente que se caracterice por tener alto coeficiente de fricción. En el caso de que se adopte el esquema sin drenaje bajo la base de la presa (Figura 15.2) y  $d = s_{sal}$  determinado de conformidad con las ecuaciones incluidas en este apartado, la configuración del fondo de la excavación puede ser diseñado por una de estas dos variantes (se supone que el suelo de cimentación admite el hincado de pilotes): presa con dentellones poco profundos (Figura 15.12, a); presa sin dentellones (Figura 15.12b).

Por consideraciones económicas es necesario tender a la primera variante (Figura 15.12a) adoptando  $d'$  con el fin de que parte de la base de la presa (tramo  $MN$ ) se ubique sobre suelo suficientemente resistente y poco permeable. Únicamente en los casos de suelos en los cuales la excavación en el fondo bajo el dentellón presente dificultades, cabe prescindir de las variantes mostradas en la Figura 15.12a y adoptar la variante de presa sin dentellones (Figura 15.12b).

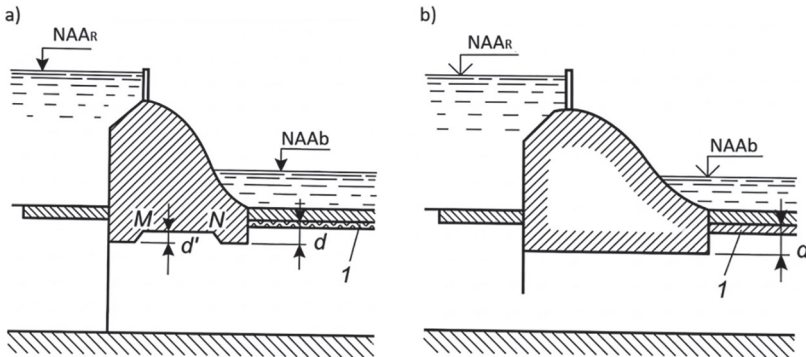


Figura 15.12. Para el diseño de la base de la presa.

a- presa con dentellones poco profundos; b- presa sin dentellones; 1- filtro invertido.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

### 15.3.5. Elemento de salida hacia aguas abajo del flujo de filtración

En el sector donde se ubica la sección de flujo de salida es necesario incluir drenaje protegido desde abajo por un filtro invertido. Dicho filtro debe ser diseñado de conformidad con los criterios establecidos en el capítulo “Sistemas fluviales con embalse de regulación y las normas aplicables”.

El drenaje horizontal ubicado bajo la losa de disipación, la presa y la carpeta cabe construir con material de granulometría gruesa. El espesor mínimo de este drenaje cabe considerar 0,20 m. La evacuación del agua desde el drenaje, así como su capacidad de flujo, en lo posible deben ser diseñados de tal manera que las pérdidas de carga en el movimiento del agua a lo largo del drenaje sean despreciables.

El drenaje conjuntamente con el filtro invertido debe ser comprimido sobre el suelo por el peso de las partes de la estructura ubicadas arriba. Esto es especialmente importante en el caso de que el suelo de cimentación sea arcilloso, el mismo que en ausencia de carga compresora es proclive a perder gradualmente la resistencia en su superficie.

La salida más deseable del flujo de filtración al drenaje se muestra en la Figura 15.13a, cuando  $s_{sal}$  es suficientemente grande; no cabe ubicar el drenaje con el esquema de la Figura 14.13b, cuando  $s_{sal} = 0$ , por cuanto en este caso en el punto A se obtiene una gradiente de salida teóricamente igual a infinito, en cuyo caso la operación del filtro invertido podría presentar complicaciones. El esquema de ubicación del drenaje mostrado en la Figura 15.13c, cuando el valor de  $t$  sea suficiente puede considerarse prácticamente aceptable.

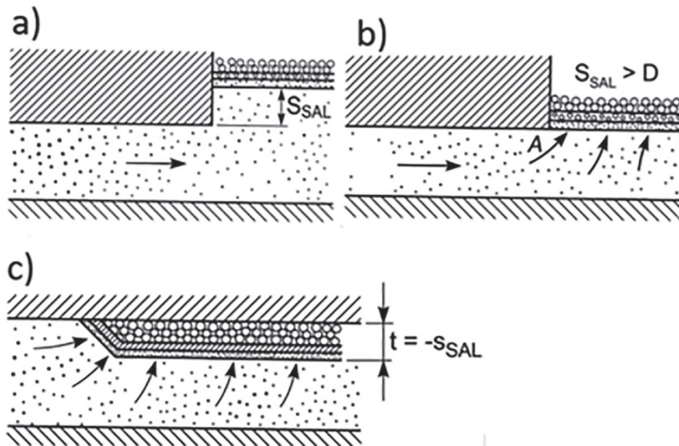


Figura 15.13. Para el diseño de la salida del flujo de filtración hacia el tramo aguas abajo. a- salida normal; b- salida indeseable; c- salida permisible.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

En algunos casos la evacuación del agua hacia aguas abajo, desde el drenaje ubicado bajo la presa, se realiza a través de la galería especial de drenaje III, ubicada algunas veces bajo el nivel de agua en el tramo aguas abajo (Figura 15.3). En estas condiciones el drenaje horizontal bajo la presa se une con una galería de drenaje a través del pozo especial IV, relleno de piedra del tamaño correspondiente. La sección horizontal de estos pozos es rectangular de dimensiones, por ejemplo, 0,8 x 0,8 m, altura del pozo 1 a 2 m y más.

## 15.4. Preparación de la superficie de cimentación: filtración de contacto

### 15.4.1. Preparación de la superficie de cimentación para el hormigonado

Para la preparación de la superficie del suelo de cimentación de una construcción hidráulica de contención antes de colocar la mezcla del hormigón, de tal manera que, entre el suelo de cimentación y el

hormigón de la estructura no surjan vías de filtración fácil. Desde este punto de vista en la práctica de la construcción de presas es totalmente no permisible colocar una capa de piedra o grava.<sup>1</sup> El carácter de la preparación de la superficie de cimentación para lograr una adherencia compacta del hormigón al suelo de cimentación se debe adoptar en función del tipo de suelo, presencia de agua subterránea y las condiciones del proceso constructivo.

En los casos de macizos de cimentación constituidos por arenas y limos arenosos, cuando el nivel de agua subterránea está bajo el fondo de la excavación, la mezcla de hormigón debe ser colocada directamente en el suelo nivelado sin realizar, por ejemplo, compactación de piedra en el suelo de cimentación. En caso de que el nivel del agua subterránea esté sobre el fondo de la excavación, es necesario bombeo o drenaje.

En los casos de abatimiento del nivel es necesario:

- Cuando el suelo está constituido por arena gruesa la mezcla de hormigón es posible colocar directamente en la superficie del suelo de cimentación.
- Cuando el suelo está constituido por arena fina se recomienda previamente colocar sobre la superficie del suelo una mezcla de hormigón de 8 a 15 cm de espesor, con hormigón de baja resistencia (por ejemplo 5 MPa) y sobre esta preparación colocar el hormigón de la presa.

En los casos de macizos de cimentación constituidos por limos arcillosos y arcillas, cuando el nivel de agua subterránea está bajo el fondo de la excavación, la mezcla de hormigón se coloca directamente sobre la superficie nivelada del suelo de cimentación. Sin embargo, en caso de que en el periodo de construcción se presenten lluvias y sobre la superficie del fondo de la excavación se forma una capa de licuada de limo arcilloso o arcilla, entonces dicha capa licuada debe ser evacuada inmediatamente antes de colocar la mezcla de hormigón. Por cuanto di-

---

1 Aquí no se hace referencia a los casos cuando, bajo la estructura hidráulica de contención, se coloca drenaje horizontal.

cha limpieza conlleva a veces a la indeseable profundización del bloque de cimentación de la presa, en algunos casos se puede:

- Colocar una capa de espesor igual al de la capa evacuada de suelo, constituida por una mezcla de hormigón de baja resistencia o por hormigón arcilloso cuidadosamente compactado.
- No proceder a la limpieza del suelo licuado sino a apisonar sobre este una capa de piedra o grava; este apisonamiento debe prolongarse hasta que la superficie de cimentación esté compacta.

Si es que la superficie del agua subterránea está sobre el fondo de la excavación y luego del abatimiento en el fondo de la excavación la capa del suelo superficial es tan poco resistente que fácilmente se transforma en masa licuada como consecuencia del tránsito de personas y vehículos, en la preparación de la superficie de cimentación es necesario optar por uno de los siguientes métodos:

- La capa superficial licuada se retira y en su lugar se coloca una capa de hormigón de baja resistencia o de hormigón arcilloso cuidadosamente compactado.
- Sobre la capa superficial licuada se apisona piedra o grava.

Complementariamente, en caso de que al ejecutar la excavación en algunos sitios se produzca sobreexcavación, estos espacios deben ser llenados con hormigón de baja resistencia o con un suelo cuidadosamente compactado que no tenga asentamiento (por ejemplo, hormigón arcilloso).

#### ***15.4.2. Algunas consideraciones sobre la filtración de contacto***

La filtración de contacto puede ser peligrosa cuando en el contacto del suelo y el hormigón (o el metal) se forma una grieta o surgen espacios de suelo descompactado. En caso de que el suelo se adhiera en forma compacta a la superficie del hormigón o a la superficie lateral de los pilotes cabe considerar que la resistencia a la filtración de la capa de contacto es semejante a la resistencia a la filtración de las capas del suelo dispuestas en el espesor del macizo de cimentación. No cabe pre-

ocuparse por la filtración de contacto si es que la masa de hormigón se apoya firmemente (compactamente) en el suelo con toda su superficie de cimentación y su peso se transmite al suelo.

Durante la construcción de la presa vertedero se adoptan las medidas necesarias para evitar que surjan zonas de suelo descompactado o grietas en el contacto del suelo y las partes impermeables de la estructura, tanto en el periodo de construcción como en el de operación. En particular, para evitar la peligrosa filtración de contacto es necesario:

- Los trabajos relacionados con la construcción del bloque de cimentación de la presa deben ser ejecutados con debido cuidado y permanentemente controlados.
- Prestar especial atención a que durante la operación de la presa a lo largo del contorno subterráneo no se forman caminos de filtración concentrada debido a una u otra posible deformación de la presa y del suelo de cimentación. No es permisible transmitir el peso de la presa de hormigón a los pilotes implantados bajo la presa. Cabe también tener cuidado de las construcciones de tipo losa disipadora delgada de hormigón armado no separada con junta de deformación de las pilas. Es necesario tomar en cuenta que en el caso de suelo de cimentación constituido por arena muy suelta bajo la base de la presa pueden tener lugar asentamientos locales y en determinados sectores horizontales del contorno subterráneo pueden formarse grietas entre la base de la presa y la superficie del suelo de cimentación.
- Cabe rellenar con suelo los espacios entre pilotes, caso contrario, a la par de una drástica disminución del efecto impermeabilizante de la tablestaca se forman vías aligeradas de filtración a lo largo de las tablestacas.
- Prestar atención a la calidad de la unión de la carpeta y la tablestaca con la presa.
- Para la construcción de las juntas permanentes de deformación de la presa cabe tender a que en caso de asentamientos

desiguales de dos bloques vecinos separados por las juntas de deformación, no surja la peligrosa filtración de contacto en el sitio de ubicación de la junta.

En conclusión, cabe advertir que para el diseño de las partes subterráneas de la presa es necesario: *prever las condiciones* que permitan durante el periodo de operación de la estructura realizar la reparación independiente de sus diferentes partes y *prever la instalación de piezómetros* (sensores) en los correspondientes puntos del contorno subterráneo a fin de que durante el proceso de operación de la presa en dichos puntos sea posible medir la subpresión real. Para las presas de niveles de importancia I y II la instalación de los mencionados piezómetros debe ser obligatoria.

## **15.5. Análisis del flujo de filtración bajo el contorno subterráneo de la presa de hormigón**

### ***15.5.1. Aspectos generales***

Ante todo, es importante recordar que las características y efectos de un flujo depende fundamentalmente de la carga, es decir de la diferencia de los niveles de agua entre los tramos aguas arriba y aguas abajo.

El análisis de filtración que a continuación se considera, al igual que todos los componentes del diseño de una presa, corresponde al modelo bidimensional. Es decir, está referido a un metro de longitud de la presa; en el caso más general este análisis es necesario para determinar:

- La subpresión que actúa bajo la presa y que influye en su estabilidad y en la distribución de esfuerzos en el contacto presa-suelo de cimentación.
- La gradiente máxima a la salida del flujo de filtración, necesaria para el diseño del filtro invertido.
- La gradiente de control del flujo de filtración, útil para verificar la resistencia a la filtración del suelo de cimentación.
- El caudal de filtración.

Existen varios métodos para el análisis del flujo de filtración bajo el contorno subterráneo. Un método de amplia aplicación es el de los coeficientes de resistencias formulado por R. R. Chugaev, se basa en la semejanza de este flujo con el flujo a presión en conductos cerrados, de esta manera en el análisis tienen un rol importante los coeficientes de resistencia, a través de los cuales se determinan las pérdidas de carga, tanto longitudinales (a lo largo de los elementos longitudinales del contorno subterráneo) como locales (en los elementos verticales y de giro del contorno subterráneo), (ver apéndice B). De esta manera (Figura 15.14), la línea piezométrica P-P tiene la forma de una línea quebrada constituida por tramos rectos inclinados y verticales. La presión hidromecánica en cualquier punto del contorno subterráneo se determina por la profundidad  $h_p$  a la que se encuentra el punto, respecto a la línea piezométrica.

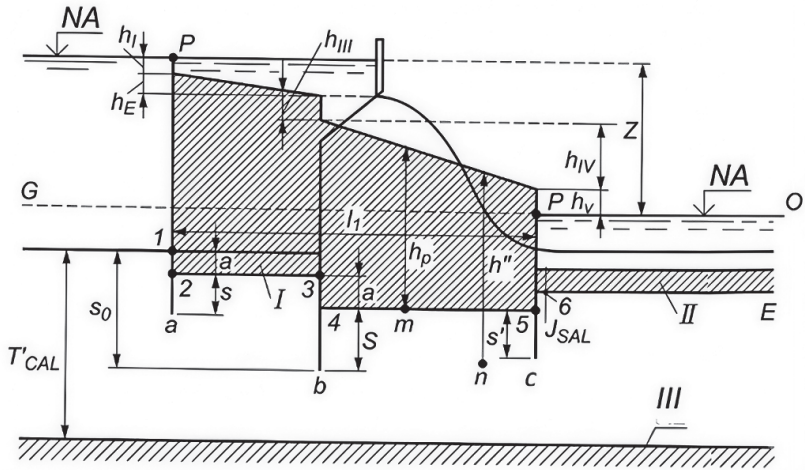


Figura 15.14. Esquema de cálculo en el análisis hidráulico del contorno subterráneo de una presa vertedero a gravedad de hormigón cimentada en suelo por el método de los coeficientes de resistencia.

I- carpeta; II- drenaje; III- superficie de diseño de la capa impermeable; P-P línea piezométrica para el contorno subterráneo.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

En el análisis del flujo de filtración por el método de los coeficientes de resistencia cabe resolver, entre otros, los siguientes más importantes problemas:

- Construcción del diagrama de subpresión para los elementos horizontales del contorno subterráneo, determinación de la carga en el extremo inferior de la tablestaca o dentellón ubicado aguas abajo (de salida) y determinación de la gradiente piezométrica de control  $i_{con}$  para controlar la resistencia casual del suelo de cimentación a la filtración.
- Determinación de la gradiente máxima en la superficie del fondo aguas abajo, a la salida del flujo de filtración.
- Determinación del caudal de filtración.

#### ***15.5.2. Determinación de la ubicación de la superficie de la capa impermeable***

Para resolver estos problemas es necesario determinar la ubicación de cálculo del nivel impermeable la misma, que no necesariamente coincide con la ubicación real. El espesor de cálculo  $T_{CAL}$ , de acuerdo al método de los coeficientes de resistencia, debe ser diferente para resolver los tres problemas mencionados.

En adelante, a través de los símbolos  $T'_{CAL}$ ,  $T''_{CAL}$  y  $T'''_{CAL}$  serán identificadas las profundidades de cálculo para determinar, respectivamente:

- Las pérdidas de carga  $h_j$  y la subpresión  $W$ .
- La gradiente máxima a la salida del flujo de filtración  $J_{MAX,SAL}$ .
- El caudal de filtración  $q$ .

A través de  $T_{REAL}$  se identificará la profundidad real de la capa permeable.

El espesor de la capa permeable se mide desde el nivel impermeable hasta el punto más alto de la superficie de cimentación. Antes de determinar el espesor de cálculo de la capa permeable, previamente cabe determinar el espesor de la capa activa ( $T'_{ACT}$ ,  $T''_{ACT}$ ,  $T'''_{ACT}$ ), es decir de aquella capa que ciertamente incide en la magnitud de los parámetros

a ser determinados; cualquier incremento al espesor de la capa activa tiene incidencia despreciable en dicha magnitud.

El espesor de cálculo, en cualquiera de los tres problemas, es el menor entre el espesor real y el espesor de la capa activa.

El espesor de la capa activa de carga  $T'_{ACT}$  depende de las características constructivas del contorno subterráneo (Tabla 14.1).

Tabla 14.1  
Espesor de la capa activa de filtración

Esquema del contorno subterráneo	Relación $\frac{l_o}{s_o}$	Ecuación	$T'_{ACT}$	Ecuación
Ensanchado	$> 5$	(14.5)	$0,5l_o$	(14.6)
Intermedio	$3,4 \leq \frac{l_o}{s_o} < 5$	(14.7)	$2,5s_o$	(14.8)
Profundo	$1 \leq \frac{l_o}{s_o} < 3,4$	(14.9)	$0,8s_o + 0,5l_o$	(14.10)
Muy profundo	$0 \leq \frac{l_o}{s_o} < 1$	(14.11)	$s_o + 0,3l_o$	(14.12)

$l_o$ : proyección horizontal del contorno subterráneo.  
 $s_o$ : proyección vertical del contorno subterráneo.

$$T''_{ACT} = 2T'_{ACT} \tag{14.13}$$

Siempre que  $T_{REAL} \leq \frac{l_o}{2}$ , de asumirse:  $T'''_{CAL} = T_{REAL}$ ; cuando  $T_{REAL} > 0,5l_o$ , para determinar el caudal de filtración no debe aplicarse el método de coeficientes de resistencia sino otro método, por ejemplo, el de la línea desarrollada del contorno subterráneo que será explicado más abajo.

### 15.5.3. Identificación de los coeficientes de resistencia

En el flujo de filtración bajo el contorno subterráneo de una presa de hormigón, en el caso más general se distinguen los siguientes coeficientes de resistencia:

Tabla 14.2  
Identificación de los coeficientes de resistencia

Identificación del coeficiente de resistencia	Símbolo
En la entrada del flujo de filtración	$\zeta_{ent}$
En la salida del flujo de filtración	$\zeta_{sal}$
En un escalón	$\zeta_{esc}$
En una tablestaca	$\zeta_{tab}$
En un elemento horizontal	$\zeta_l$

**15.5.4. Determinación de los valores de los coeficientes de resistencia**

A partir de las soluciones obtenidas a través de la teoría matemática de la filtración, los valores de los coeficientes de resistencia pueden ser adoptados de la siguiente manera:

- Coeficiente de resistencia en la entrada o salida del flujo de filtración (pérdida de carga por el giro del flujo):

$$\zeta_{ent} = \zeta_{sal} = 0,44 \tag{14.14}$$

- Coeficiente de resistencia en un escalón:

$$\zeta_{esc2} = \frac{a}{T_1} \tag{14.15}$$

Donde:

$a$ : alto del escalón.

$T_1$ : mayor espesor de la capa permeable, a la izquierda o a la derecha del escalón.

- Coeficiente de resistencia en una tablestaca:

$$\zeta_{tab} = 1,5 \frac{s}{T_2} + \frac{0,5 \frac{s}{T_2}}{1 - 0,75 \frac{s}{T_2}} \tag{14.16}$$

Donde:

$s$ : alto de la tablestaca.

$T_2$ : menor espesor de la capa permeable, a la izquierda o a la derecha de la tablestaca.

- Coeficiente de resistencia en un elemento longitudinal:

Cuando:

$$l > 0,5(s_1 + s_2) \quad (14.17)$$

$$\zeta_l = \frac{l - 0,5(s_1 + s_2)}{T} \quad (14.18)$$

Cuando:

$$l \leq 0,5(s_1 + s_2) \quad (14.19)$$

$$\zeta_l = 0 \quad (14.20)$$

Donde:

$l$ : longitud del elemento horizontal.

$s_1$  y  $s_2$ : alto de las tablestacas entre las que se encuentra el elemento horizontal, en caso de haberlas.

$T$ : espesor de la capa permeable bajo el elemento horizontal.

#### ***15.5.5. Determinación de las pérdidas de carga, de la subpresión y del diagrama de subpresión***

Una vez determinado  $T'_{CAL}$  e identificados los coeficientes de resistencia, se procede a determinar los valores de dichos coeficientes de resistencia con las ecuaciones anteriormente identificadas. A continuación, se determina la pérdida de carga en cada uno de los elementos del contorno subterráneo y con esta información, finalmente, se construye el diagrama de subpresión. Para el efecto es necesario tener en cuenta que:

- La carga disponible  $Z$  se distribuye en las pérdidas de carga  $h_j$  en forma proporcional al valor de cada coeficiente de resistencia  $\zeta_j$ , es decir:

$$\sum h_j = Z \quad (14.21)$$

Y

$$h_j = \zeta_j \frac{Z}{\sum \zeta_j} \quad (14.22)$$

- Determinar con la ecuación anterior, la pérdida de carga en cada elemento del contorno subterráneo (ver Figura 15.14:  $h_I, h_{II}, h_{III}, h_{IV}, h_V$ ) se construye la línea piezométrica P-P.
- La superficie obtenida (sombreada en la figura anterior), comprendida entre la línea piezométrica construida P-P y el contorno subterráneo 1-2-3-4-5-6 constituye el diagrama de subpresión requerido y cuya superficie es igual al valor total  $W$  de la subpresión.
- Es importante recordar que la subpresión incluye dos componentes: subpresión de sumersión  $W_s$ , dada por la superficie del diagrama ubicada bajo el nivel de agua aguas abajo; y, subpresión excedente, dada por la superficie del diagrama de subpresión ubicada sobre el nivel de agua aguas abajo.

### ***15.5.6. Determinación de la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración***

La gradiente máxima  $J_{\text{MAX.SAL}}$ , a la salida del flujo de filtración se presenta en el punto 6 del contorno subterráneo (ver esquemas del contorno subterráneo).

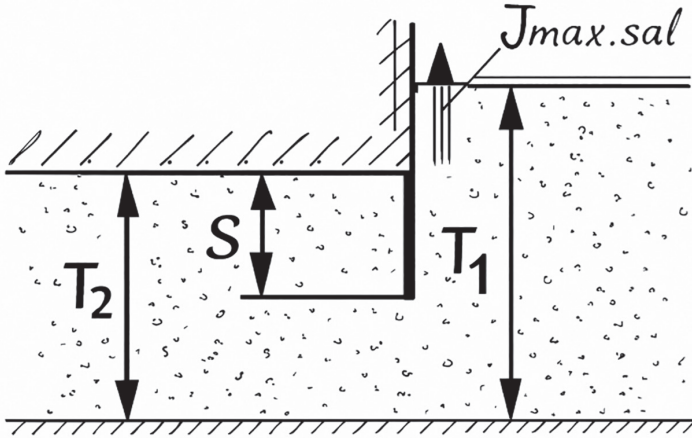


Figura 15.15. Gradiente de salida del flujo de filtración.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

Luego de establecer, a través de  $T''_{CAL}$ , la ubicación del nivel de cálculo de la capa impermeable y de determinar para esta ubicación los coeficientes de resistencia  $\zeta_j$  para los diferentes elementos de contorno y su suma  $\sum \zeta_j$ , la gradiente máxima a la salida del flujo de filtración se determina con la siguiente ecuación:

$$J_{MAX.SAL} = \left(\frac{Z}{T_1}\right) \frac{1}{\alpha} \quad (14.23)$$

Donde:

$T_1$ : espesor de la capa permeable bajo el filtro invertido a la salida del flujo de filtración.

$\alpha$ : coeficiente que se determina con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \sqrt{\text{seno} \left[ 0,5\pi \left( \frac{s}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} + 1 \right) \right]} \quad (14.24)$$

Donde:

S: longitud de la tablestaca ubicada al final del contorno, caso de haberla.  
 $T_2$ : espesor de la capa permeable bajo el filtro invertido a la salida del flujo de filtración.

$T_1$ : espesor de la capa permeable bajo la presa.

### 15.5.7. Determinación del caudal de filtración $q$

Cuando el espesor real  $T_{REAL}$  de la capa permeable cumple la condición  $T_{REAL} \leq 0,5l_o$ , el caudal de filtración  $q$  se determina de la siguiente manera:

- Se asume  $T'''_{CAL} = T_{REAL}$ .
- Para el valor  $T'''_{CAL}$  se determinan los coeficientes de resistencia  $\zeta_j$  de todos los elementos del contorno su suma  $\sum \zeta_j$ .
- Se determina el caudal de filtración con la ecuación:

$$q = k \frac{Z}{\sum \zeta_j} \tag{14.25}$$

Donde:

$k$ : coeficiente de filtración.

Cuando el espesor real de la capa permeable es mayor al 50 % del valor de la proyección horizontal del contorno ( $T_{REAL} > 0,5l_o$ ) el caudal se determina por el método de la línea desarrollada del contorno subterráneo, a través de la ecuación de Darcy.

$$q = k \frac{Z}{0,5l_o + 0,88T_{CAL}} T_{CAL} \tag{14.26}$$

Donde:

$$T_{CAL} = 0,5l_o$$