

Apéndice B

**Cálculo y diseño del contorno
subterráneo de presas y muros
de enlace cimentados en suelo**

B.1. Aspectos generales

B.1.1. Campo de aplicación

Los procesos de este apéndice se aplican al diseño del contorno subterráneo de las presas cimentadas en suelo, así como a los muros de enlace que forman parte de dichas presas y tienen relleno con suelos arenosos o arcillosos. Los criterios pueden también ser aplicados para el diseño de otras estructuras hidráulicas de contención (esclusas, casas de máquinas de las centrales hidroeléctricas implantadas en los cauces fluviales y otras).

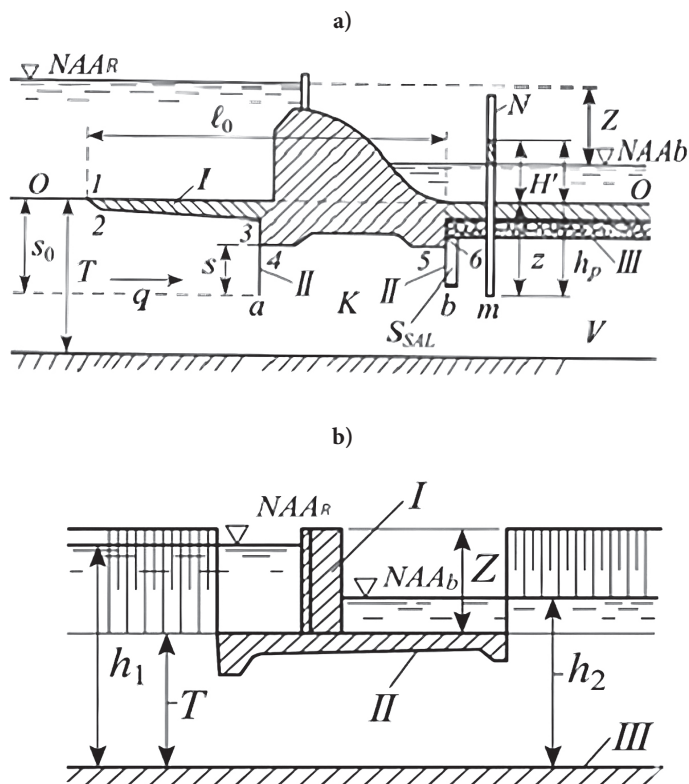
B.1.2. Definiciones de términos

Al considerar el perfil transversal de una presa cabe describir la *línea que limita la presa* de hormigón a gravedad con vertido incorporado (presa vertedero) desde abajo y que separa todas sus partes constructivas (cimentación de la presa, drenaje, carpeta, tramo del resalto, tramo permeable post resalto y otras) del suelo de cimentación. Esta línea es conocida como el contorno y convencionalmente limita desde abajo únicamente los elementos impermeables y poco permeables de la presa, que tienen contacto directo con el suelo de cimentación (Figura B.1, línea 1-2-3-a-4-5-b-6).

El *muro de enlace* de la presa (o de otra estructura hidráulica de contención) se denomina también *muro lateral de hormigón* y enlaza la estructura dada con la presa de tierra o con la ladera del sitio de cierre. Al considerar la sección horizontal de un muro de enlace, cabe distinguir la línea que limita dicho muro desde su cara interna (desde el lado del relleno tras el muro) y que separa todas sus partes constructivas (muro lateral, muro frontal, espolón, drenaje de la parte inferior del talud y otras) del suelo de la ladera o del relleno de la presa de tierra, con la cual se enlaza el muro. La línea indicada puede ser denominada *contorno subterráneo real del muro* y es aquella parte que limita desde el costado (desde el lado interno del muro) únicamente los elementos impermeables del muro que están en contacto directo con el suelo de la

ladera, o con el suelo que forma el relleno de la presa (en la Figura B.1, b la línea 1-2-3-4-5-6).

Por *solución razonable del contorno subterráneo de la estructura* se entiende aquel contorno subterráneo (de toda la serie de los posibles) con el cual, por una parte la estructura (presa o muro) sea resistente y estable, y, por otra parte, en la forma más razonable se combinen las siguientes condiciones: económica, menor complejidad de los procesos constructivos y plazo corto de ejecución, la posibilidad de utilizar para la construcción materiales del lugar y la comodidad para la operación de la presa.



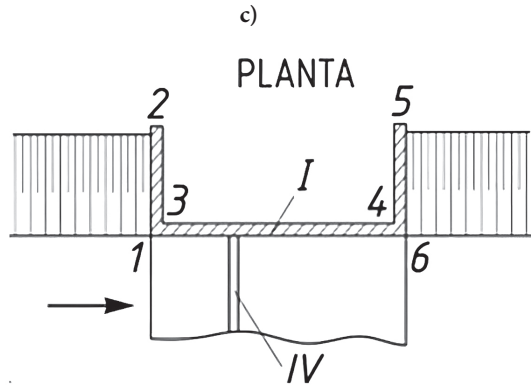


Figura B.I. Esquemas de los contornos subterráneos.

1-2-3-a-4-5-b-6- contorno subterráneo de la presa; I- carpeta poco permeable; II- tablestaca; III- filtro invertido; IV- piezómetro imaginario; V- límite de la capa impermeable del suelo; 1-2-3-4-5-6- contorno subterráneo del muro de enlace; I-muro; II- losa de disipación; III- límite de la capa impermeable del suelo; IV- presa vertedero.

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

Como *capa impermeable* se denomina a la superficie prácticamente impermeable del suelo sobre la que yace la capa permeable en la que está cimentada la presa.

Suelo no homogéneo es el suelo que tiene diferentes características físico-mecánicas en distintos puntos de su masa (estructura granulométrica, coeficiente de filtración, indicadores de corte, etc.); para un suelo de granulometría heterogénea con estructura granulométrica uniforme las curvas de composición granulométrica en los puntos considerados son iguales.

El *suelo tubificable* es aquel suelo dentro del cual o en su límite externo por acción de la filtración pueden surgir (para determinadas velocidades de filtración) peligrosas deformaciones por filtración, es decir, desplazamientos de las partículas del suelo que llevan a deformaciones del esqueleto de este y a una disminución no permisible de su capacidad portante y de su resistencia a la filtración.

La *resistencia a la filtración del suelo* es la capacidad del suelo de resistir a que en su interior surjan deformaciones peligrosas debidas a la filtración.

El *drenaje* es un elemento constructivo que sirve para receptor y evacuar el agua de filtración.

El *filtro invertido* es un elemento constructivo que atraviesa dos o más capas de suelo no cohesivo (formadas por fracciones de diferente tamaño) y que sirve para evitar la deformación de tubificación externa por acción de la filtración.¹

Finalmente, el *desplazamiento local por filtración* es la deformación del suelo debido al movimiento de un determinado volumen de suelo principalmente por acción de las fuerzas de filtración.

B.1.3. Principales magnitudes que intervienen

L : longitud del contorno subterráneo (Figura B.1a, línea 1-2-3-a-4-5-b-6).

l_o : longitud de la proyección del contorno subterráneo en la horizontal.

s_o : longitud de la proyección del contorno subterráneo en la vertical.

Z : carga que actúa en la estructura, es decir, la diferencia de niveles del agua en los tramos aguas arriba (NAAR) y aguas abajo (NAAB). En el caso de ausencia de agua en el tramo aguas abajo, Z es la elevación del nivel de agua en el tramo aguas arriba, sobre la superficie del fondo en el tramo aguas abajo.

s : profundidad de penetración de la fila de tablestacas en el suelo de cimentación.

1 Con alguna frecuencia el suelo del filtro invertido es remplazado por hormigón poroso, tejido sintético, etc.

S_{sat} : profundidad de penetración del borde inferior de la tableta de salida (o de la base del dentellón de salida) bajo el fondo del cauce aguas abajo (que es la superficie de salida del flujo de filtración aguas hacia aguas abajo).

T : profundidad de ubicación de la superficie de la capa impermeable bajo el fondo de los tramos aguas arriba y aguas abajo o bajo la base de la presa o de la carpeta.

q : caudal unitario del agua que filtra bajo la presa.

H : carga en el punto dado del suelo de cimentación (por ejemplo, en el punto m), es decir, la elevación del nivel de agua en el piezómetro imaginario conectado al punto considerado, respecto a la superficie horizontal 0-0 arbitrariamente seleccionada (denominada superficie o nivel de referencia).

h : pérdida de carga en el tramo de filtración considerado:

$$H = H' - H'' \quad (\text{B.1})$$

Donde:

H' : carga en el punto inicial del camino o tramo de filtración.

H'' : carga en el punto final del tramo de filtración.

h_p : altura piezométrica, que determina la magnitud de la presión en el punto considerado del suelo de cimentación y que es igual a la suma de dos magnitudes: la carga de presión en el punto considerado y la profundización de este punto bajo la superficie de referencia, así:

$$h_p = p/\gamma_o = H + z \quad (\text{B.2})$$

Donde:

γ_o : peso específico del agua.

J : gradiente piezométrica (también gradiente hidráulica o gradiente de carga, en el flujo de filtración) en el punto considerado del campo de filtración, igual a:

$$J = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (\text{B.3})$$

Donde:

Δl : longitud elemental medida en el punto considerado a lo largo de la línea de flujo.

Δh : pérdida de carga a lo largo de dicha longitud elemental.

K : coeficiente de filtración del suelo.

$v = nv_R$: velocidad de filtración.

v_R : velocidad real del movimiento del agua en los poros del suelo.

n : porosidad volumétrica del suelo.

B.1.4. Objetivos principales del cálculo y diseño del contorno subterráneo

Para el diseño de los elementos subterráneos que forman parte de las estructuras hidráulicas (cimentación de la presa y las partes correspondientes de los muros hidráulicos) es necesario seleccionar el denominado contorno subterráneo razonable de la presa y de los muros que forman parte del nodo fluvial. Estos contornos que satisfacen las condiciones mencionadas en el punto B.1.2 deben permitir la resistencia a la filtración del suelo de cimentación y de los estribos de las laderas.

Cabe considerar que en relación a la solución de este problema surge una de las principales incógnitas en el diseño de una estructura hidráulica de contención cimentada en suelo: cuál es la longitud mínima de las rutas de filtración que se puede contraponer (para las condiciones dadas) a la carga que actúa sobre la estructura (sin el riesgo infundado de que se produzcan peligrosas deformaciones por filtración en el suelo). La longitud adoptada de las rutas de filtración debe asegurar la confiabilidad suficiente de la estructura. Complementariamente deben también encontrar respuesta las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la presión hidrodinámica desde el flujo de filtración sobre uno u otro elemento de la estructura?
- ¿Cuál es la magnitud de las fuerzas de filtración que disminuyen la estabilidad del suelo de cimentación y de las laderas?
- ¿Cuál sería el caudal de filtración que se pueda esperar con el contorno subterráneo adoptado?

Al considerar todas las preguntas e incógnitas enumeradas respecto al cálculo y diseño es necesario analizar las soluciones estrictamente constructivas que permitan disminuir el efecto negativo de la filtración en la operación de la estructura y disminuir su costo.

B.2. Cálculo de filtración del contorno subterráneo dado de una presa conocidas las cotas de los niveles de agua en los tramos aguas arriba y aguas abajo

B.2.1. Consideraciones previas

Para proceder al cálculo hidráulico de un contorno subterráneo dado ante todo es necesario elaborar el esquema de cálculo de dicho contorno subterráneo. Este esquema se obtiene del esquema real al excluir diferentes tipos de detalles del contorno, respecto a los cuales de antemano se puede afirmar que ellos no pueden influir substancialmente en los resultados del cálculo. En una serie de casos, para elaborar el esquema de cálculo los dentellones delgados de hormigón, con el fin de simplificar el cálculo cabe reemplazarlos por tablestacas impermeables de la correspondiente longitud; los dentellones finos pueden ser eliminados del esquema de cálculo, etc.

A continuación, se reemplaza un campo de filtración comúnmente no homogéneo del suelo de cimentación por un medio isotrópico homogéneo caracterizado por tener determinado coeficiente de filtración. Es necesario tomar en cuenta que la distribución de cargas en el suelo de cimentación, y la magnitud de las gradientes piezométricas en sus diferentes puntos no dependen absolutamente de la magnitud asumida

del coeficiente de filtración. Del coeficiente de filtración depende únicamente el caudal de filtración cuya magnitud es directamente proporcional al coeficiente de filtración.

Es necesario tomar en cuenta también que, las gradientes piezométricas en diferentes puntos del suelo de cimentación en absoluto no dependen de las cotas de los niveles de agua en los tramos aguas arriba y aguas abajo, sino que se determinan para el contorno subterráneo dado por la magnitud de la carga Z que actúa sobre la estructura. En cambio, las magnitudes de la carga en los diferentes puntos del suelo de cimentación sí dependen de las cotas de los niveles de agua en los tramos. Debido a esto la magnitud de la subpresión que actúa en la base de la presa depende, por ejemplo, de la profundidad del agua en el tramo aguas abajo.

El cálculo de filtración puede desarrollarse considerando un metro lineal de longitud de la presa. De acuerdo con el método de los coeficientes de resistencia, la línea piezométrica P-P construida para el contorno subterráneo se adopta en forma de una línea quebrada constituida por una serie de tramos rectos inclinados y por una serie de escalones verticales que corresponden a aquellos sitios del contorno subterráneo donde el flujo de filtración en su ruta encuentra uno u otro obstáculo (resistencia) local en forma de filas de tablestacas, escalones y giros del contorno subterráneo (Figura B.2).

La presión hidromecánica en cualquier punto del contorno subterráneo, por ejemplo, en el punto m , está determinada por la profundidad h'_p a la que se encuentra dicho punto respecto a la línea piezométrica P-P, medida en el sitio correspondiente (Figura B.2). Con alguna aproximación a partir de la línea piezométrica dada, se puede también encontrar la presión hidromecánica en el espesor del suelo de cimentación (Figura B.2 en el punto n y la altura piezométrica que le corresponde h''_p).

Al aplicar el método de los coeficientes de resistencia pueden ser resueltos los siguientes problemas:

- Construir el diagrama de subpresión para los elementos horizontales del contorno subterráneo, determinar la carga en el extremo inferior (en la punta) de la tablestaca o dentellón inferior (a la salida) y determinar la gradiente piezométrica de control J_C que permite controlar la resistencia general a la filtración del suelo de cimentación.
- Determinar la gradiente piezométrica máxima de salida en la superficie del fondo del cauce aguas abajo.
- Determinar la magnitud del caudal de agua de filtración.

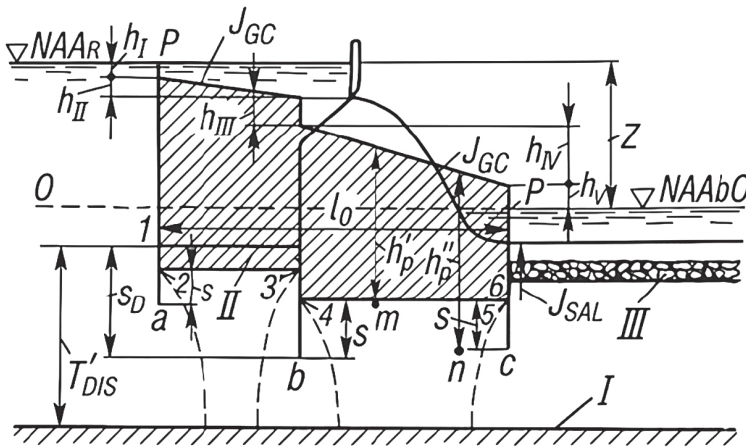


Figura B.2. Esquema para el cálculo del suelo de cimentación por el método de los coeficientes de resistencia.

P-P- línea piezométrica para los elementos horizontales del contorno subterráneo (2-3) y (4-5); I- superficie de diseño de la capa impermeable; II- carpeta; III- drenaje.

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

Para resolver los problemas enumerados es necesario adoptar la posición totalmente determinada de la superficie impermeable de diseño, la misma que en el caso más general puede no coincidir con la super-

ficie impermeable real. La profundidad T_{DIS} (Figura B.2) que determina la ubicación para diseño de la superficie impermeable de acuerdo con el método de los coeficientes de resistencia debe ser en el caso más general, diferente para los temas de filtración enunciados en los tres puntos anteriormente enumerados.

A continuación, a través de T'_{DIS} , T''_{DIS} , T'''_{DIS} se identifica la profundidad de la superficie de diseño de la capa impermeable para resolver los tres problemas enunciados. Con el valor de T_R se identifica la profundidad de la superficie real de la capa impermeable.

Las magnitudes T_{DIS} y T_R siempre deben ser medidas verticalmente desde la superficie de la capa impermeable hasta el punto del contorno subterráneo ubicado en la mayor cota.

Para resolver uno u otro de los problemas de filtración identificados, es necesario realizar previamente los siguientes cálculos de apoyo:

- Determinar la ubicación de la superficie de la capa impermeable de diseño.
- A partir de la magnitud encontrada de T_{DIS} , se determina los valores numéricos de los denominados coeficientes de resistencia para cada uno de los elementos del contorno subterráneo, como se indica más abajo.

B.2.2. Determinación de la ubicación de la superficie de diseño de la capa impermeable

B.2.2.1. Superficie de diseño de la capa impermeable

Permite construir el diagrama de subpresión, que determinará la carga en la punta de la tablestaca de salida y así obtener la gradiente J_c para el control de la resistencia general a la filtración del suelo de cimentación. Cuando se determina T'_{DIS} se aplica el concepto de la zona activa de filtración para la carga, por lo cual, a través de T'_{act} se representa la profundidad de esta zona activa de filtración (medida también desde el punto del contorno subterráneo ubicado en la cota más alta).

El sentido o significado del concepto de zona activa de filtración para la carga se desprende de lo siguiente: la superficie obtenida del diagrama de subpresión para el caso cuando $T < T'_{act}$ es diferente a la superficie del diagrama de subpresión determinada para el caso $T = \infty$, en cambio, la superficie del diagrama de subpresión determinada para el caso cuando $T = T'_{act}$ prácticamente coincide con la superficie del diagrama de subpresión determinada para el caso $T = \infty$.

Se identifica a través de l_o la longitud de la proyección del contorno subterráneo en la horizontal y a través de s_o la longitud de la proyección del contorno subterráneo en la vertical (Figura B.2). Utilizando estas identificaciones, la magnitud T'_{act} debe ser determinada con las siguientes ecuaciones:

Para un *contorno subterráneo ensanchado*:

Cuando:

$$\frac{l_o}{s_o} \geq 5 \quad (B.4)$$

Entonces:

$$T'_{act} = 0,5l_o \quad (B.5)$$

Para un *esquema intermedio*:

Cuando:

$$3,4 \leq \frac{l_o}{s_o} \leq 5 \quad (B.6)$$

Entonces:

$$T'_{act} = 0,25s_o \quad (B.7)$$

Para un *contorno subterráneo profundo*:

Cuando:

$$1,0 \leq \frac{l_o}{s_o} \leq 3,4 \quad (\text{B.8})$$

Entonces:

$$T'_{act} = 0,8s_o + 0,5l_o \quad (\text{B.9})$$

Para un *contorno subterráneo muy profundo*:

Cuando:

$$0 \leq \frac{l_o}{s_o} \leq 1,0 \quad (\text{B.10})$$

Entonces:

$$T'_{act} = s_o + 0,3l_o \quad (\text{B.11})$$

Si la profundidad real de la superficie impermeable es:

$$T_R \leq T'_{act} \quad (\text{B.12})$$

Cabe adoptar:

$$T'_{DIS} = T_R \quad (\text{B.13})$$

Y en el caso que:

$$T_R > T'_{act} \quad (\text{B.14})$$

Cabe adoptar:

$$T'_{DIS} = T'_{act} \quad (\text{B.15})$$

B.2.2.2. *Superficie de diseño de la capa impermeable para determinar la máxima gradiente piezométrica de salida en la superficie del fondo del cauce aguas abajo*

La magnitud T''_{act} que determina la ubicación de la superficie de la capa impermeable cabe encontrar utilizando la definición de la denominada *zona activa de filtración para la gradiente piezométrica de salida*. La profundidad de esta zona activa (análoga a la zona activa de filtración considerada en el punto anterior) se identifica a través de T''_{act} y es medida también desde el punto del contorno subterráneo ubicado en la cota más alta.

La magnitud T''_{act} debe ser determinada con la ecuación:

$$T''_{act} = 2T'_{act} \quad (B.16)$$

Donde:

T'_{act} : se determina como se ha indicado en el punto anterior.

En el caso de que la profundidad real a la que se encuentra la superficie de la capa impermeable sea:

$$T_R \leq T''_{act} \quad (B.17)$$

Entonces cabe adoptar:

$$T''_{DIS} = T_R \quad (B.18)$$

En el caso que:

$$T_R > T''_{act} \quad (B.19)$$

Entonces cabe adoptar:

$$T''_{DIS} = T''_{act} \quad (B.20)$$

B.2.2.3. Superficie de diseño de la capa impermeable para determinar la magnitud del caudal de filtración en el suelo de cimentación de la presa

La magnitud T'''_{DIS} que determina la ubicación de esta superficie se determina con la expresión:

$$T'''_{DIS} = T_R \quad (B.21)$$

Es decir que, en este caso, en calidad de superficie de diseño de la capa impermeable se debe adoptar la superficie real de la capa impermeable.

B.2.3. Procedimiento general del cálculo por el método de los coeficientes de resistencia

Para resolver este u otro problema de filtración, determinando la correspondiente ubicación de diseño del nivel impermeable, se divide el contorno subterráneo dado en elementos separados del siguiente tipo:

- Elementos de entrada y salida del contorno subterráneo en forma de tablestacas de entrada y de salida (Figura B.2, elementos 1-a-2 y 5-6-b), en caso de ausencia de estas tablestacas en forma de escalones de entrada y salida (Figura B.2, elementos 1-2 y 5-6) o en el caso de ausencia de las tablestacas y los escalones, en forma de *entrada plana* y *salida plana* (Figura B.5d). En el último caso, los elementos de entrada y salida del contorno pasan a ser puntos (punto A, Figura B.5d).
- Tablestacas interiores. En la Figura B.2 se encuentra solo una tablestaca interior (3-b-4), sin embargo, en el caso más general puede haber algunas tablestacas de este tipo. Si la magnitud $s = 0$ entonces, en lugar de la tablestaca interior 3-b-4 se tiene el escalón vertical interior 3-4.
- Elementos horizontales del contorno subterráneo (elementos 2-3 y 4-5 en la Figura B.2).

Con esta división del contorno subterráneo se obtienen únicamente tres elementos tipo del contorno (con los correspondientes casos

particulares). Las pérdidas de carga h a lo largo de la línea de cada elemento del contorno son iguales a:

$$h = H' - H'' \quad (\text{B.22})$$

Donde:

H' : carga en el punto inicial del elemento.

H'' : carga en el punto final del elemento.

Por ejemplo, para la tablestaca interior 3-b-4, la magnitud h es la diferencia de cargas en el punto 3 y en el punto 4.

En el caso de la filtración laminar, la magnitud h para cada elemento separado del contorno puede ser presentada a través de la siguiente ecuación:

$$h = \zeta \frac{q}{k} \quad (\text{B.23})$$

Donde:

ζ : coeficiente de resistencia que depende de la forma y dimensiones del elemento considerado del contorno, así como también de la magnitud T_{DIS} .

Las identificaciones de los coeficientes de resistencia son:

- ζ_{en} y ζ_{sal} son los coeficientes de resistencia del elemento de entrada y del elemento de salida del contorno subterráneo.
- ζ_{tab} es el coeficiente de resistencia de una tablestaca interior; en el caso de que $s=0$ se tiene en lugar de ζ_{tab} el coeficiente de resistencia del escalón interior ζ_{esc} .
- ζ_l es el coeficiente de resistencia de un elemento longitudinal del contorno.
- $\sum \zeta_i$ es el coeficiente sumatorio de resistencia del contorno subterráneo considerado.

Para el contorno subterráneo mostrado en la Figura B.2:

$$\sum \zeta_i = \zeta_{en} + \zeta'_i + \zeta_{tab} + \zeta''_i + \zeta_{sal} \quad (\text{B.24})$$

Donde:

ζ'_i y ζ''_i : coeficientes de resistencia, respectivamente, del primero y segundo elemento horizontal del contorno subterráneo.

Es posible demostrar que los valores numéricos de los coeficientes de resistencia no dependen de la dirección del flujo de filtración. Por consiguiente, en caso de formas y dimensiones iguales de los elementos de entrada y salida se tendría:

$$\zeta_{en} = \zeta_{sal} \quad (\text{B.25})$$

Al conocer los valores numéricos del coeficiente de resistencia ζ_i para todos los elementos del contorno subterráneo dado, así como también, la posición altimétrica de los niveles de agua en los tramos aguas arriba y aguas abajo, es posible —con la ayuda de ecuaciones relativamente sencillas— resolver cualquier problema de filtración. Se deben tomar en cuenta premisas conceptuales básicas como que la carga Z que actúa sobre la estructura debe distribuirse entre los diferentes elementos del contorno subterráneo, proporcionalmente a los valores de los correspondientes coeficientes de resistencia.

Como se puede apreciar, la tarea fundamental en el cálculo del contorno subterráneo por el método de los coeficientes de resistencia es determinar los valores numéricos de los coeficientes de resistencia para los diferentes elementos del contorno, con una u otra posición de la superficie de diseño de la capa impermeable del suelo de cimentación.

B.2.4. Determinación de los valores numéricos de los coeficientes de resistencia

A cada uno de los elementos del contorno subterráneo corresponde determinado fragmento propio del suelo de cimentación de la

presa (Figura B.3, Figura B.5, Figura B.6, las líneas punteadas son líneas de carga constante que salen de los puntos de quiebre del contorno).

Las magnitudes ζ que se determinan a continuación, consideran que los fragmentos del suelo de cimentación están relacionados a los correspondientes elementos del contorno subterráneo, sin que al ejecutar los cálculos prácticos se preste algún interés por aquellos fragmentos en los que ha sido dividido el suelo de cimentación. Por ejemplo, en el caso de filtración uniforme confinada (a presión) en un macizo rectangular del suelo de cimentación de longitud L y altura T , el coeficiente de resistencia de dicho fragmento rectangular de cimentación es igual a:

$$\zeta_{hor} = \frac{L}{T} \tag{B.26}$$

El valor del coeficiente de resistencia debe ser referido al elemento horizontal del contorno subterráneo de longitud L y considerar que la característica de resistencia de este elemento horizontal constituye la magnitud ζ_{hor} calculada con la ecuación (B.26).

Razonando de manera similar para determinar los coeficientes de resistencia buscados, se pueden formular las ecuaciones que se desarrollan en los siguientes numerales.

B.2.4.1. Coeficiente de resistencia de una tablestaca interior o escalón

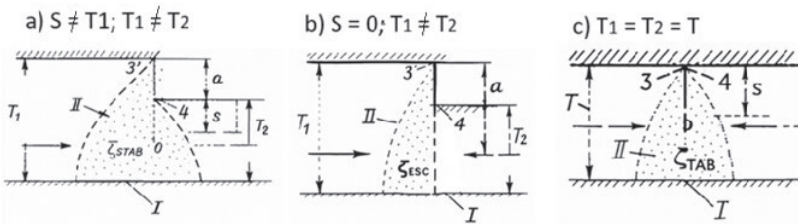


Figura B.3. Fragmento del contorno subterráneo en forma de tablestaca interior o escalón interior.

I- superficie de diseño de la capa impermeable; II- correspondiente fragmento del suelo de cimentación.
 Fuente: Chugaev, R. R. (1985). *Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado*. AGROPROMIZDAT.

Cuando:

$$0,5 \leq \frac{T_2}{T_1} \leq 1,0 \quad (\text{B.27})$$

$$0 \leq \frac{S}{T_2} \leq 0,8$$

$$\zeta_{tab} = \frac{a}{T_1} + 1,5 \frac{S}{T_2} + \frac{0,5 \frac{S}{T_2}}{1 - 0,75 \frac{S}{T_2}} \quad (\text{B.28})$$

Cuando:

$$0,5 \leq \frac{T_2}{T_1} \leq 1,0$$

$$0,8 \leq \frac{S}{T_2} \leq 0,96 \quad (\text{B.29})$$

$$\zeta_{tab} = \frac{a}{T_1} + 12 \left(\frac{S}{T_2} - 0,8 \right) + 2,2 \quad (\text{B.30})$$

Donde los símbolos a , S , T_1 y T_2 están indicados en la Figura B.2a.

Cuando $S = 0$, de acuerdo con la ecuación B.28 se obtiene (Figura B.2b):

$$\zeta_{esc} = \frac{a}{T_1} \quad (\text{B.31})$$

Cuando $T_1 = T_2 = T$, es decir, $a = 0$, las ecuaciones B.28 y B.30 se simplifican; en este caso por la magnitud T_2 en dichas ecuaciones cabe entender que se trata de la magnitud T (Figura B.3c).

Valores algo más exactos de ζ_{tab} y ζ_{esc} es posible obtener de la Figura B.4, de R. R. Chugaev, aplicando la solución hidromecánica de S. N. Numerov.

B.2.4.2. Coeficiente de resistencia de los elementos de entrada y salida del contorno subterráneo, y de las dos tablestacas

En el caso más general (Figura B.5a y b):

$$\zeta_{en} = \zeta_{sal} = \zeta_{tab} + 0,44 \tag{B.32}$$

Donde:

ζ_{tab} : se determina bajo el supuesto que la tablestaca de entrada o salida constituye tablestaca interior.

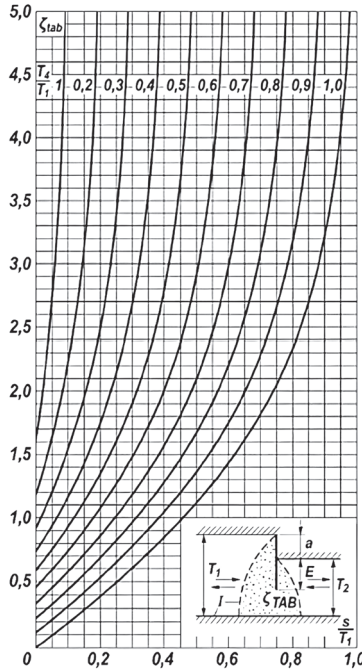


Figura B.4. Gráfico para determinar el coeficiente de resistencia ζ_{tab} para una tablestaca interior.

I- superficie de la capa impermeable (en el esquema de la tablestaca interior).

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

En el caso particular que $s = 0$ (Figura B.5c), entonces:

$$\zeta_{en} = \zeta_{sal} = \zeta_{esc} + 0,44 \tag{B.33}$$

Donde:

ζ_{esc} : se determina con la ecuación B.31 o en la Figura B.4 (para $\frac{s}{T_1} = 0$).

En el caso particular que $s = 0$ y $a = 0$ (Figura B.5d) el elemento de entrada o de salida del contorno, como ya se anotó, se transforma en un punto (punto A), cuyo coeficiente de resistencia es:

$$\zeta_{en} = \zeta_{sal} = 0,44 \tag{B.34}$$

Este coeficiente de resistencia puede ser denominado *coeficiente de resistencia de un giro puro*, del flujo en 90°.

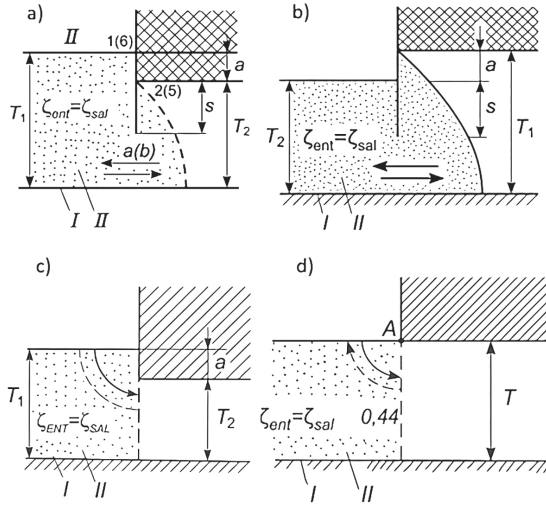


Figura B.5. Fragmento del contorno subterráneo en forma de tablestaca de entrada o salida [o escalón].

I- superficie de la capa impermeable; II- fragmento correspondiente del suelo de cimentación.

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

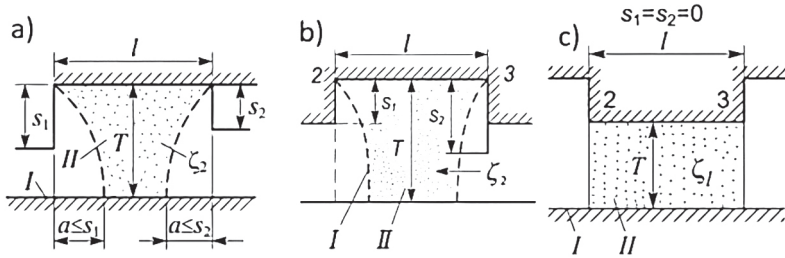


Figura B.6. Fragmento del contorno subterráneo en forma de elemento horizontal. I- superficie de la capa impermeable; II- fragmento correspondiente del suelo de cimentación. Fuente: Chugaev, R. R. (1985). *Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado*. AGRO-PROMIZDAT.

En los casos relativamente poco frecuentes cuando la distancia entre dos tablestacas interiores de longitudes s_1 y s_2 resulta ser:

$$l \leq 0,5(s_1 + s_2) \tag{B.35}$$

El coeficiente sumatorio de resistencia de estas dos tablestacas se puede asumir (para $T_1 = T_2 = T$) igual a:

$$2\zeta_{tab} = \zeta'_{tab} + \frac{l}{0,5(s_1 + s_2)} \zeta''_{tab} \tag{B.36}$$

Donde:

ζ'_{tab} : coeficiente de resistencia relativo a la tablestaca más larga.

ζ''_{tab} : coeficiente de resistencia relativo a la tablestaca más corta.

Con la aclaración que ζ'_{tab} y ζ''_{tab} se calculan con las ecuaciones B.28 o B.30.

Como se puede apreciar, cuando $l = 0,5(s_1 + s_2)$ la magnitud $2\zeta_{tab} = \zeta'_{tab} + \zeta''_{tab}$. Cuando $l = 0$, la magnitud $2\zeta_{tab} = \zeta'_{tab}$.

Operando con la ecuación B.36 es posible calcular $2\zeta_{tab}$ cuando se tiene la presencia de escalones de altura a , así como también el coe-

ficiente sumatorio de resistencia de dos tablestacas, cuando una de ellas es interior y la otra de entrada o salida.

B.2.4.3. Coeficiente de resistencia de los elementos horizontales del contorno

En este punto existen dos casos.

Primero, cuando:

$$l \geq 0,5(s_1 + s_2) \quad (\text{B.37})$$

Entonces:

$$\zeta_l = \frac{l - 0,5(s_1 + s_2)}{T} \quad (\text{B.38})$$

Donde el significado de los signos está indicado en el gráfico.

Segundo, cuando:

$$l \leq 0,5(s_1 + s_2) \quad (\text{B.39})$$

Entonces:

$$\zeta_l = 0 \quad (\text{B.40})$$

B.2.4.4. Coeficiente de resistencia de una tablestaca pura

En la práctica de diseño es posible encontrarse con el esquema de tablestaca pura (Figura B.7). El coeficiente de resistencia para dicho esquema, con ayuda del cual (Ecuación B.23) es posible expresar la magnitud $h = Z$ a través del caudal ponderado (q/k), se identifica a través de ζ_{tabp} . La magnitud ζ_{tabp} puede ser determinada en la Figura B.7.²

2 Este gráfico fue elaborado por R. R. Chugaev, aplicando el método de N. N. Pavlovsky y la solución de B. I. Korotkov.

Cuando:

$$\frac{s}{T_1} \geq 0,05 \dots 0,10 \tag{B.41}$$

La magnitud ζ_{tabp} puede ser determinada también con la ecuación:

$$\zeta_{tabp} = \zeta_{tab} + 0,88 \tag{B.42}$$

Donde:

ζ_{tab} : se determina como está indicado en el punto B.2.4.1, es decir, bajo el supuesto de que la tablestaca considerada es interior.

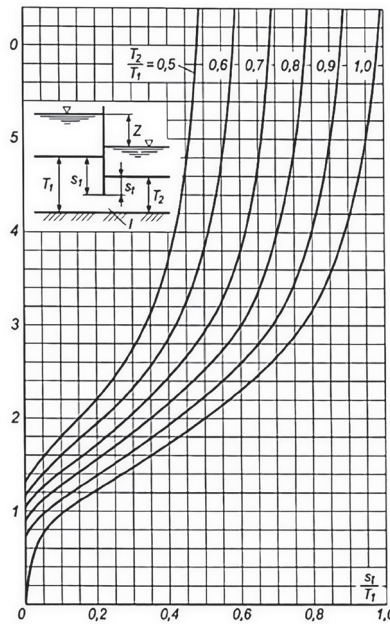


Figura B.7. Gráfico para determinar el coeficiente de resistencia ζ_{tabp} de una tablestaca pura.

I- superficie de diseño de la capa impermeable.

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

B.2.4.5. Ecuaciones simplificadas para los coeficientes de resistencia en el caso de esquemas fuertemente ensanchados del contorno subterráneo y tablestacas relativamente cortas

Identificando a través de $T', T'', T''', \dots, T^{(n)}$ la profundidad de la superficie de la capa impermeable bajo el fondo del tramo aguas arriba, del tramo aguas abajo, de la base de la presa, etc.

En la práctica con frecuencia puede encontrarse el esquema de contorno que satisfaga las siguientes condiciones:

$$\frac{s}{T} \leq 0,44$$

$$T' \approx T'' \approx T''' = \dots \approx T^{(n)}$$

$$l - 0,5(s_1 + s_2) \approx l \quad (\text{B.0})$$

Es decir, la magnitud $0,5(s_1 + s_2)$ puede ser despreciada en comparación con la longitud l del elemento horizontal del contorno subterráneo.

Cuando se cumplen las condiciones indicadas para calcular el contorno subterráneo, se pueden utilizar únicamente dos coeficientes de resistencia:

$$\zeta_{int} = \frac{l_{ele}}{T_m} \quad (\text{B.A})$$

$$\zeta_{en} = \zeta_{sal} = \frac{l_{ele}}{T_m} + 0,44 \quad (\text{B.B})$$

Donde:

ζ_{int} : coeficiente de resistencia de cualquier elemento interno del contorno (horizontal, tablestaca interior, escalón interior).

l_{ele} : longitud del elemento considerado del contorno subterráneo (por ejemplo, para una tablestaca de longitud s y $T_1 = T_2, l_{ele} = 2s$).

T_m : valor medio aritmético de las magnitudes $T', T'', T''', \dots, T^n$.

B.2.5. Construcción del diagrama de la subpresión que actúa en la base de la presa y de la carpeta

Una vez determinada a partir de la magnitud $T'_{D/S}$ (como se vio en el numeral B.2.2), la ubicación de la superficie de diseño de la capa impermeable, y luego de encontrar a partir de dicha ubicación los valores numéricos de los coeficientes de resistencia de cada uno de los elementos del contorno (punto B.2.4), se construye la línea piezométrica P-P para los elementos horizontales del contorno (Figura B.2) en base a la norma anteriormente establecida: la carga total Z que actúa en la estructura (es decir, la pérdida de carga a lo largo de todo el contorno subterráneo) debe distribuirse entre los diferentes elementos del contorno en forma directamente proporcional a los valores numéricos de los coeficientes de resistencia.

De acuerdo con esta norma, la pérdida de carga h_n en la longitud de cualquier elemento n del contorno, es igual a:

$$h_n = \frac{Z}{\sum \zeta} \zeta_n \quad (\text{B.43})$$

Donde:

ζ_n : coeficiente de resistencia del elemento n considerado.

Determinando con la ecuación B.43 las pérdidas de carga a lo largo de cada elemento del contorno (por ejemplo, las pérdidas de carga $h_I, h_{II}, h_{III}, h_{IV}$ mostradas en la Figura B.2), se construye a partir de estas pérdidas de carga, la línea piezométrica P-P. La superficie obtenida (sombreada en la Figura B.2), ubicada entre la línea piezométrica encontrada P-P y el mismo contorno subterráneo 1-2-3-4-5-6 representa el diagrama de subpresión buscado.

Al realizar la construcción mencionada cabe distinguir el caso especial cuando el elemento de entrada o salida del contorno (Figura B.8) se caracteriza por la condición:

$$\frac{S}{T_1} < \frac{1}{4} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{1}{3} \right) \quad (\text{B.44})$$

Es decir, cuando se tiene un contorno subterráneo con el elemento de entrada o salida cercano o coincidente con una entrada o salida plana.

Cuando se presenta la condición (B.44), la pérdida de carga antes encontrada para el elemento de entrada o salida del contorno (h_{en} o h_{sal} en la Figura B.2 están identificados a través de h_I o h_V) puede a veces diferenciarse considerablemente de la pérdida de carga real en el elemento de entrada o de salida identificada a continuación como $(h_{en})_R$ o $(h_{sal})_R$.

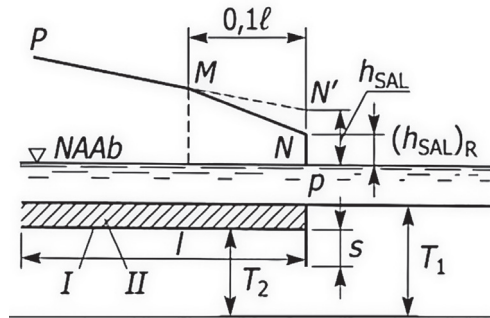


Figura B.8. Ajuste del final de la línea piezométrica P-P en caso de encontrarse a poca profundidad la parte final del contorno subterráneo.

I- superficie impermeable de diseño; II- estructura de disipación.

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

El desfase en las magnitudes h_{en} y $(h_{en})_R$ o h_{sal} y $(h_{sal})_R$ tiene carácter local y con frecuencia puede ser despreciado (especialmente para el elemento de entrada referido a una carpeta). Sin embargo, si se desea evitar que dicho desfase surja, si se presenta la condición B.44, se procede de la siguiente manera:

En primer lugar, se calculan los valores reales de las pérdidas de carga $(h_{en})_R$ y $(h_{sal})_R$ con las ecuaciones:

$$\begin{aligned} (h_{en})_R &= \delta h_{en} \\ (h_{sal})_R &= \delta h_{sal} \end{aligned} \tag{B.45}$$

Donde:

$$0,7 \leq \frac{T_2}{T_1} \leq 1,0 \tag{B.46}$$

La magnitud δ es:

$$\delta = \sqrt{\sin \left[\frac{3}{4} \pi \left(4 \frac{s}{T_1} + 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \right]} \tag{B.47}$$

Los parámetros s, T_1 y T_2 están indicados en la Figura B.8. El valor límite máximo de δ es 1. Valores más exactos de δ pueden ser encontrados en el gráfico de la Figura B.9.

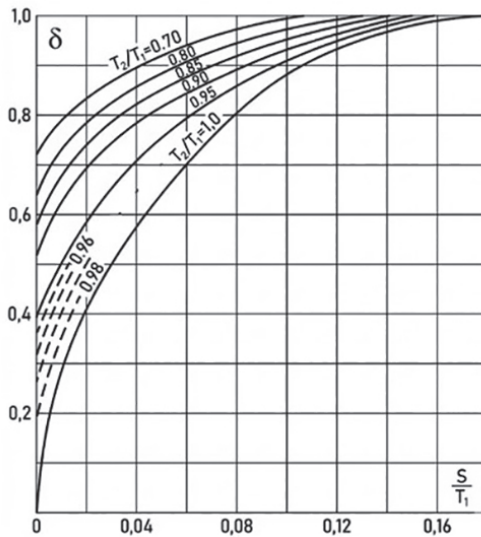


Figura B.9. Gráfico para determinar el ajuste δ a la ecuación B.47.

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

En segundo lugar, teniendo la línea piezométrica PN'P (Figura B.8), construida conforme fue aclarado anteriormente, y considerando, por ejemplo, el elemento de salida del contorno, se coloca como se muestra en la figura la magnitud $(h_{sal})_R$ y de esta manera se obtiene el punto N . A continuación, el punto N se une a través de una recta con el punto M identificado en la línea PN'P a la distancia $0,1l$ desde el final de la estructura de disipación, donde l es la longitud de dicha estructura.

La línea piezométrica ajustada o corregida tendrá finalmente la forma de la línea recta quebrada PMNP (el tramo MN'N es descartado una vez realizado el ajuste o corrección de la línea piezométrica).

B.2.6. Determinación de la carga en el extremo inferior de la tablestaca o dentellón de salida

La magnitud de la carga h_{ei} en el extremo inferior de la tablestaca de salida (punto α en la Figura B.10a) se determina con la ecuación:

$$h_{ei} = \varepsilon h_{sal} \quad (\text{B.48})$$

En este caso, h_{sal} se determina en el cálculo del diagrama de subpresión sin tomar en cuenta el ajuste δ , es decir, con la ubicación de diseño de la superficie impermeable, determinada con la magnitud T'_{DIS} . Por su parte, la magnitud del coeficiente ε para el caso considerado es:

$$0,7 \leq \frac{T_1}{T_2} \leq 1,0; \quad \frac{s}{T_2} > 0,1 \quad (\text{B.49})$$

Cabe determinar con la ecuación aproximada:

$$\varepsilon = 0,8 - 0,3 \frac{s}{T_1} \quad (\text{B.50})$$

Donde el significado de los símbolos se muestra en la Figura B.10a.

El esquema de la Figura B.10b es un caso particular del esquema de la Figura B.10a. Sin embargo, la magnitud h_{ei} en el punto α para este

esquema cabe determinar no con la ecuación (B.50), sino en correspondencia con la segunda ecuación (B.45).

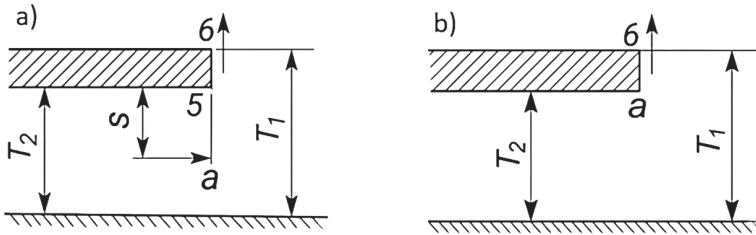


Figura B.10. Esquema para determinar la carga en el extremo inferior de la tablestaca de salida.

I- superficie de diseño de la capa impermeable.

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

B.2.7. Determinación de la máxima gradiente piezométrica de salida en la superficie del fondo aguas abajo

La gradiente piezométrica máxima de salida se presentó en el numeral B.2.6 (Figura B.2).

Determinando a partir de la magnitud T''_{DIS} (numeral B.2.2) la ubicación de diseño de la superficie impermeable y una vez establecidos para dicha ubicación los valores de los coeficientes de resistencia para los diferentes elementos del contorno (numeral B.2.4), así como el valor del coeficiente sumatorio de resistencia $\sum \zeta$, la magnitud J_{sal} se determina con la ecuación obtenida por R. R. Chugaev en correspondencia con la solución hidromecánica de S. N. Numerov:

$$J_{sal} = \frac{z}{T_1} \frac{1}{\alpha \sum \zeta} \tag{B.51}$$

Donde el coeficiente α se determina en la Figura B.11, en función de las relaciones s/T_1 y T_2/T_1 . Aquí las dimensiones s , T_1 y T_2 se relacionan con el elemento de salida del contorno (el esquema de este elemento se muestra en el gráfico siguiente).

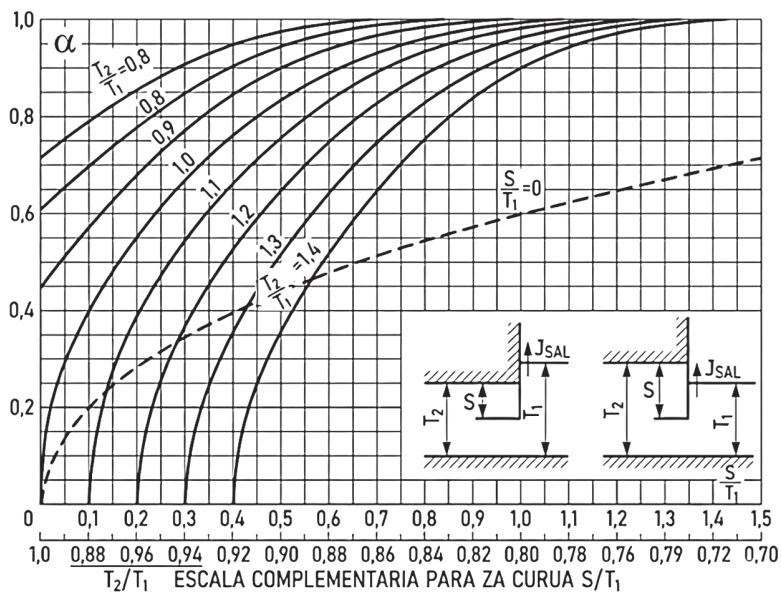


Figura B.II. Para calcular la máxima gradiente piezométrica de salida en la superficie del fondo aguas abajo.

Gráfico para determinar el coeficiente α que interviene en la ecuación de cálculo de la máxima gradiente piezométrica de salida en la superficie del fondo aguas abajo. I- superficie impermeable de diseño.

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

Para el caso:

$$0,7 \leq \frac{T_2}{T_1} \leq 1,4 \tag{B.52}$$

El coeficiente α puede también ser determinado con la siguiente ecuación aproximada:

$$\alpha = \sqrt{\sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{s}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} + 1 \right) \right]} \tag{B.53}$$

En los casos particulares, cuando $s/T_1 = 0$ o cuando $T_1 = T_2 = 3$, entonces T , en lugar de la ecuación anterior, vale aplicar las ecuaciones exactas de S. N. Numerov.

Cuando $\frac{s}{T_1} = 0$:

$$\alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2} \tag{B.54}$$

Cuando $T_1 = T_2 = T$:

$$\alpha = \sqrt{\sin\left(\frac{\pi s}{2T}\right)} \tag{B.55}$$

En el caso cuando la superficie impermeable se ubica a una considerable profundidad, por ejemplo, T_2 se considera igual a ∞ y, por consiguiente T'_{D1S} se adopta igual a T'_{act} la ecuación (B.51) da valores algo disminuidos de J_{sal} (no más que el 10 %). Por esta razón en caso de valores altos de T_R cabe introducir en la ecuación (B.51) un coeficiente de ajuste igual a 1,1 y utilizar dicha ecuación con la siguiente forma:

$$J_{sal} = 1,1 \frac{Z}{T_1} \frac{1}{\alpha \Sigma \zeta} \tag{B.56}$$

A continuación, se consideran dos casos especiales

B.2.7.1. Caso cuando el flujo de filtración sale con el fondo descendido del tramo aguas abajo

La gradiente J_{sal} para el tramo de la sección de flujo de salida **ab** con alguna aproximación puede ser determinada con la ecuación:

$$J_{sal} = \left(\frac{0,075}{d_o} + \frac{2,75}{l'}\right) h \tag{B.57}$$

Donde:

d_o : espesor de la capa de drenaje.

h : pérdida de carga en determinada longitud l' del contorno subterráneo.

La magnitud l' se adopta bajo la premisa de que debe cumplirse la desigualdad.

$$l' \geq 10d_o \quad (\text{B.58})$$

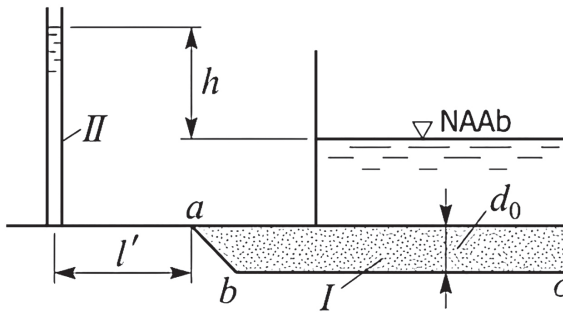


Figura B.12. Para calcular la máxima gradiente piezométrica de salida.

I- drenaje; II- piezómetro imaginario.

Fuente: los autores.

B.2.7.2. Caso de tablestaca pura

El esquema de esta tablestaca se muestra en la Figura B.13, donde también están identificadas las correspondientes magnitudes. La gradiente J_{sai} debe ser determinada en el gráfico de la Figura B.13. Es necesario recalcar que al aplicar este gráfico no cabe utilizar el concepto de superficie de cálculo de la capa impermeable (en el cálculo es necesario aplicar la superficie real de la capa impermeable).

Cuando la superficie real de la capa impermeable está ubicada a una gran profundidad, la magnitud J_{sai} (para $T_1 = T_2$) es recomendable determinar por la ecuación de N. N. Pavlovsky:

$$J_{sal} = 0,318 \frac{Z}{s} \tag{B.59}$$

Donde:

s: profundidad de hincado de la tablestaca.

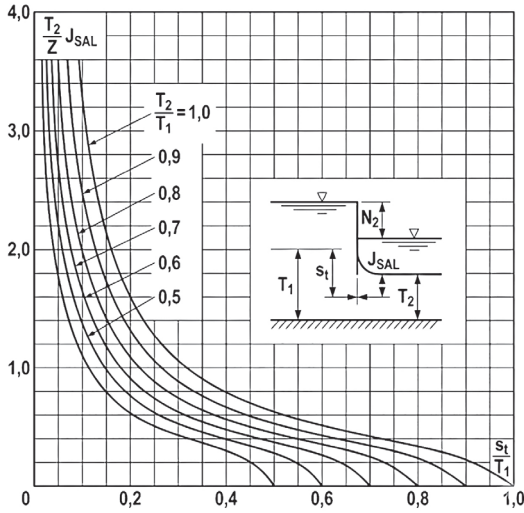


Figura B.13. Esquema para calcular la gradiente piezométrica máxima de salida en el caso de tablestaca pura.

I- superficie de cálculo de la capa impermeable.

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

B.2.8. Determinación del caudal de filtración

Una vez que, a partir de la magnitud $T'_{DIS} = T_R$ (numeral B.2.2), han sido determinados los coeficientes de resistencia ζ (numeral B.2.4), a continuación, es posible determinar el caudal de filtración q con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{Z}{\Sigma \zeta} k \tag{B.60}$$

En el caso de una ubicación profunda de la capa impermeable (cuando T_R es considerablemente mayor a T_{act}), el caudal obtenido con la ecuación B.60 puede tener un alto margen de error. Por esta razón, para valores altos de T_R el caudal de filtración debe ser obtenido por el método de la línea desarrollada del contorno subterráneo.

B.2.8.1. Ejemplo de cálculo

Dado el contorno subterráneo 1-2-a-3-4-b-6 (Figura B.14), el suelo de cimentación es homogéneo isotrópico, $T_R = \infty$, $Z = 10m$, la profundidad del agua en el tramo aguas abajo es igual a cero, las restantes dimensiones (en metros) se indican en la figura:

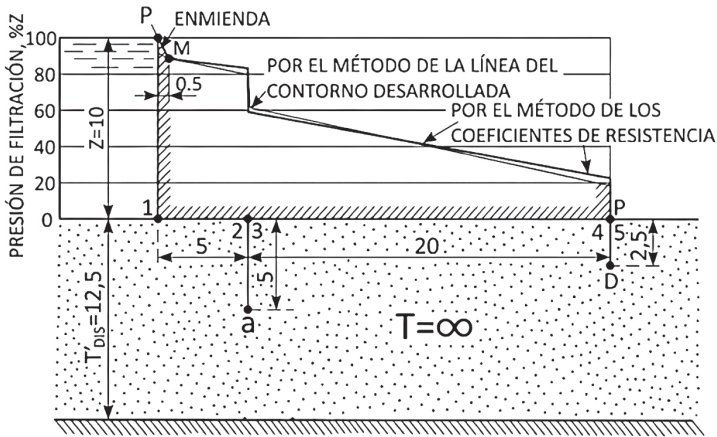


Figura B.14. Esquema para el ejemplo de cálculo.

I- superficie de diseño de la capa impermeable; II- línea piezométrica del contorno subterráneo construida por el método de los coeficientes de resistencia; III- línea piezométrica construida por el método de la línea desarrollada del contorno.

Fuente: los autores.

Longitud de la proyección horizontal del contorno $l_o = 5 + 20 = 25 m$. Longitud de la proyección vertical del contorno $s_o = 5 m$. Relación $\frac{l_o}{s_o} = \frac{25}{5} = 5$, en concordancia con este valor, la profundidad de la zona activa de filtración para la carga, de acuerdo con la ecuación B.5 o B.7 es igual a: $T'_{act} = 0,5l_o = 2,5s_o = 0,5 \cdot 25 = 2,5 \cdot 5 = 12,5 m$.

Por cuanto $T_R > T'_{act}$, entonces, la profundidad de diseño de la superficie impermeable para construir el diagrama de subpresión y para determinar la carga en el extremo inferior de la tablestaca de salida es igual a las ecuaciones B.14 y B.15: $T'_{DIS} = T'_{act} = 12,5 \text{ m}$.

La profundidad de la zona activa de filtración para la gradiente de salida, de acuerdo con la ecuación B.16 se adopta igual a: $T''_{act} = 2.12,5 = 25 \text{ m}$.

Por cuanto $T_R > T''_{act}$, entonces, la profundidad de diseño de la capa impermeable para determinar la máxima gradiente piezométrica J_{sal} en la superficie del fondo aguas abajo se adopta de acuerdo a las ecuaciones B.19 y B.20: $T''_{DIS} = T''_{act} = 25 \text{ m}$.

B.2.8.1.1. Construcción del diagrama de subpresión

Se determinan los coeficientes de resistencia correspondientes a los diferentes elementos del contorno, para la superficie de diseño de la capa impermeable determinada con la dimensión T'_{DIS} :

- Coeficiente de resistencia a la entrada (para el punto de entrada 1), de acuerdo con la ecuación B.34: $\zeta_{en} = 0,44$.
- Coeficiente de resistencia del tramo horizontal 1-2 del contorno, de acuerdo con la ecuación B.38: $\zeta_{hor1-2} = \frac{5-0,5,5}{12,5} = 0,20$.
- Coeficiente de resistencia de la tablestaca interior 2-3 de acuerdo con la ecuación B.28: $\zeta_{tab2-3} = \frac{0}{12,5} + 1,5 \frac{5}{12,5} + \frac{0,5 \frac{5}{12,5}}{1-0,75 \frac{5}{12,5}} = 0,89$.
- Coeficiente de resistencia del tramo horizontal 3-4 de acuerdo con la ecuación B.38: $\zeta_{hor3-4} = \frac{20-0,5(5+2,5)}{12,5} = 1,30$.
- Coeficiente de resistencia del elemento de salida 4-b-6 del contorno subterráneo. de acuerdo con las ecuaciones B.28 y B.32: $\zeta_{sal} = \frac{0}{12,5} + 1,5 \frac{2,5}{12,5} + \frac{0,5 \frac{2,5}{12,5}}{1-0,75 \frac{2,5}{12,5}} = 0,86$.

El coeficiente sumatorio de resistencia del contorno subterráneo: $\Sigma\zeta = 0,41 + 0,20 + 0,89 + 1,3 + 0,86 = 3,69$.

$$\text{La magnitud } m = \frac{Z}{\Sigma\zeta} = \frac{10}{3,69} = 2,71.$$

Las pérdidas de carga en los diferentes elementos del contorno de acuerdo con la ecuación B.46:

$$\begin{aligned} h_I &= m(0,44) = 2,71(0,44) = 1,19 \\ h_{II} &= 2,71(0,20) = 0,54 \text{ m} & h_{III} &= 2,71(0,89) = 2,41 \text{ m} \\ h_{IV} &= 2,71(1,3) = 3,53 \text{ m} & h_V &= 2,71(0,86) = 2,33 \text{ m} \end{aligned}$$

Con las pérdidas de carga encontradas, se construye la línea piezométrica P-P (Figura B.14, la línea continua).

B.2.8.1.2. Determinación de la carga en el extremo inferior de la tablesta-ca de salida

De conformidad con las ecuaciones B.48 y B.50 se tiene:
 $h_{ei} = \left(0,8 - 0,3 \frac{2,5}{12,5}\right) 2,33 = 1,72 \text{ m}.$

B.2.8.1.3. Determinación de la máxima gradiente piezométrica de salida J_{sal} en la superficie del fondo aguas abajo

A partir de la magnitud $T'_{DIS} = 25 \text{ m}$ se determinan los valores numéricos de los coeficientes ζ y $\sum \zeta$:

$$\zeta_{en} = 0,44; \quad \zeta_{hor'} = 0,10; \quad \zeta_{tab} = 0,36; \quad \zeta_{hor''} = 0,65; \quad \zeta_{sal} = 0,62; \quad \sum \zeta = 2,37.$$

A continuación, a partir de $T_1 = T''_{DIS} = 25 \text{ m}$ y $s_{sal} = 2,5 \text{ m}$, se determina $\frac{s}{T_1} = \frac{2,5}{25} = 0,1$ y $\frac{T_2}{T_1} = 1,0$.

En consecuencia, a partir de la Figura B.11 se encuentra que el coeficiente $\alpha = 0,4$.

Finalmente, con la ecuación B.56 se determina J_{sal} :
 $J_{sal} = 1,1 \left(\frac{10}{25}\right) \left(\frac{1}{0,40(2,37)}\right) = 0,46.$

B.3. Cálculo de filtración del contorno subterráneo de una presa por el método de Chugaev conociendo las cotas de agua

B.3.1. Consideraciones previas

Para calcular un contorno subterráneo dado por el método de la línea desarrollada del contorno, es necesario tomar en cuenta las consideraciones generales del numeral B.1. Es necesario también aplicar el concepto de las superficies de diseño de la capa impermeable, cuyas profundidades de ubicación son determinadas como se explica en el numeral B.2.

Cabe tener presente que cuando se cumplen las condiciones B.0 enunciadas al final del numeral B.2.4, el grado de aproximación del método de cálculo considerado es prácticamente igual al grado de aproximación del método de los coeficientes de resistencia.

De acuerdo con el método de la línea desarrollada del contorno, cada elemento identificado en el contorno subterráneo constituye en el cálculo un elemento condicionalmente horizontal que tiene la longitud virtual:

$$\lambda = \zeta T_m \quad (\text{B.61})$$

Donde:

ζ : coeficiente de resistencia del elemento considerado del contorno subterráneo.

T_m : profundidad promedio de la superficie impermeable de diseño.

Como se puede apreciar de las ecuaciones B.A y B.B al final del numeral B.2.4, las longitudes virtuales para cada uno de los elementos del contorno pueden ser expresadas en correspondencia con la ecuación B.61, con las siguientes ecuaciones:

La primera, para cualquier elemento interno del contorno:

$$\lambda_{int} = l_{int} \quad (\text{B.62})$$

La segunda, para los elementos de entrada y salida del contorno:

$$\lambda_{ent} = \lambda_{sal} = l_{ele} + 0,44T_m = l_{ele} + \lambda_o \quad (\text{B.63})$$

Donde:

$$\lambda_o = 0,44T_m \quad (\text{B.64})$$

Puede ser denominado *tramo de resistencia complementaria* en la entrada o salida de un flujo de filtración. Los significados de los restantes símbolos se dan al final del numeral B.2.4 en la aclaración referente a las ecuaciones B.A y B.B.

La longitud virtual total de todo el contorno subterráneo, en correspondencia con las ecuaciones B.62 y B.63, se presenta de la siguiente manera:

$$\Lambda = \sum l_{ele} + 2.044T_m = L + 0,88T_m = L + 2\lambda_o \quad (\text{B.65})$$

Donde:

L : longitud real del contorno subterráneo.

B.3.2. Construcción del diagrama de subpresión y determinación de la carga en el extremo inferior de la tablestaca o dentellón de salida

Luego de determinar la profundidad de diseño de la superficie de la capa impermeable T_{DIS} (numeral B.1.2), se establece, a partir de esta profundidad, la magnitud T_m , se desdobra en una línea horizontal AB el contorno subterráneo dado (Figura B.15a), como se muestra en la Figura B.14b. La longitud de esta línea representa la longitud del contorno subterráneo L .

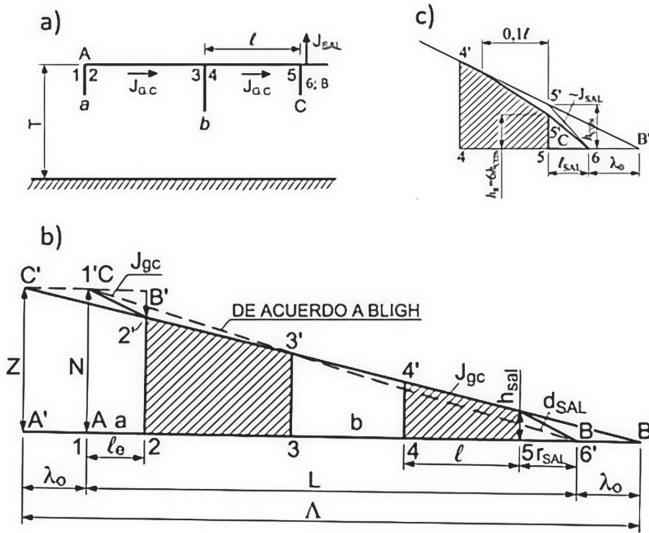


Figura B.15. Construcción del diagrama de subpresión por el método de la línea desarrollada del contorno.

I- superficie de diseño de la capa impermeable.

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

A continuación, desde los puntos A y B de la línea obtenida, respectivamente, a la izquierda y derecha, se trazan los segmentos horizontales iguales a λ_0 . De esta manera se obtiene la línea extendida del contorno subterráneo $A'B'$, cuya longitud es Λ .

Luego, se traza desde el punto A' por la vertical hacia arriba un fragmento igual a la carga Z que actúa sobre la estructura obteniendo el punto C' , uniendo el punto C' con el punto B' y con una recta se obtienen las áreas mostradas en la Figura B.15b con sombreado. Estas áreas representan los diagramas de carga para los elementos horizontales 2-3 y 4-5. Con esta construcción se tiene en mente que la superficie de referencia O-O, desde la cual se miden las cargas, está trazada en la cota del nivel de agua en el tramo aguas abajo.

Una vez obtenidos los diagramas de carga mencionados, a continuación, se construye el diagrama de subpresión que actúa en la base de la presa. Con este fin a las ordenadas de los diagramas construidos se aumentan las magnitudes de las profundidades de los puntos de contorno subterráneo respecto al nivel de agua en el tramo aguas abajo (Ecuación B.2).

Es necesario tomar en cuenta que con las líneas horizontales gruesas 1-2 y 5-6, en la Figura B.15b, se muestran las longitudes de los elementos de entrada y salida del contorno (l_{en} y l_{sal}). Los segmentos 2-2' y 5-5' expresan las cargas, respectivamente, en los puntos 2 y 5 (Figura B.15a). La magnitud de estas cargas puede ser ajustada conforme se explicó en el numeral B.1.5 (Figura B.15a, donde como resultado de introducir el ajuste δ en lugar de la carga 5-5' ha sido obtenida la carga 5-5'").

La carga en el extremo inferior de la tablestaca de salida (o dente-lón de salida) h_{ei} , se determina conociendo la magnitud h_{sal} , conforme se explica en el numeral B.1.6.

B.3.3. Determinación de la máxima gradiente piezométrica de salida en la superficie del fondo aguas abajo

La máxima gradiente piezométrica de salida J_{sal} (gradiente en el punto determinado para la superficie impermeable de diseño T'_{DIS}) se determina de la siguiente manera.

Estableciendo T_m a partir de T'_{DIS} , se realiza la misma construcción que para el caso de búsqueda del diagrama de subpresión (Figura B.15b). Luego, en el mismo gráfico, se desplaza horizontalmente el punto B' hasta el punto B y se traza la línea fuertemente inclinada $5'-B$. La pendiente de esta línea expresa la gradiente piezométrica media en el elemento de salida del contorno. A partir de este valor promedio de la pendiente, la magnitud buscada J_{sal} se expresa con la ecuación:

$$J_{sal} = \beta \frac{h_{sal}}{l_{sal}} \quad (\text{B.66})$$

Donde:

l_{sal} : longitud del elemento de salida del contorno.

h_{sal} : se representa con los tramos 5-5' (Figura B.15b).

El coeficiente β se determina con dos relaciones (los símbolos necesarios se muestran en la Figura B.16):

La primera, en el caso del esquema en la Figura B.16a:

Cuando:

$$\frac{s}{d} \geq 10 \quad \beta \approx 1,0$$

Cuando:

$$10 > \frac{s}{d} \geq 2 \quad \beta \approx 0,9 + 0,01 \frac{s}{d} \quad (\text{B.67})$$

Cuando:

$$2 > \frac{s}{d} \geq 0 \quad \beta \approx 0,8 + 0,05 \frac{s}{d}$$

Como se puede apreciar en este caso, el valor de β en promedio puede ser asumido igual a:

$$\beta_m = 0,9 \dots 1,0 \quad (\text{B.68})$$

La segunda, en el caso del esquema de la Figura B.16b:

Cuando:

$$\frac{s}{d} \geq 10 \quad \beta = 1,0 \quad (\text{B.69})$$

Cuando:

$$10 \geq \frac{s}{d} \geq 2 \qquad \beta = 1,3 - 0,03 \frac{s}{d}$$

Como se puede apreciar en este caso, el valor promedio de β puede ser asumido igual a:

$$\beta = 1,1 \dots 1,2 \qquad (B.70)$$

En el caso que se cumpla la desigualdad B.44, la ecuación B.66 cabe presentar con la siguiente forma:

$$J_{sal} \approx \beta \delta \frac{h_{sal}}{l_{sal}} \qquad (B.71)$$

Por cuanto, en la gran mayoría de casos prácticos $\delta = 1$, en tanto que la magnitud β es cercana a la unidad, se puede afirmar que aproximadamente:

$$J_{sal} \approx \frac{h_{sal}}{l_{sal}} = \frac{Z}{\Lambda} \left(1 + \frac{0,44T_m}{l_{sal}} \right) J_{sal} \approx \frac{h_{sal}}{l_{sal}} = \frac{Z}{\Lambda} \left(1 + \frac{0,44T_m}{l_{sal}} \right) \qquad (B.72)$$

Es decir, se asume que la magnitud J_{sal} es igual a la pendiente de la línea fuertemente inclinada 5'-B, mostrada en la Figura B.15b.

Se observa que al realizar construcciones similares para el tramo de entrada del contorno subterráneo se puede obtener la línea de alta pendiente C-2' (Figura B.15b), cuya pendiente determina el valor aproximado de la máxima gradiente de entrada J_{en} en la superficie del fondo aguas arriba.

Se anota, además, que en el caso de considerable profundidad de la superficie impermeable en las expresiones de la gradiente piezométrica de entrada y de salida, cabe introducir un coeficiente de seguridad $\approx = 1$.

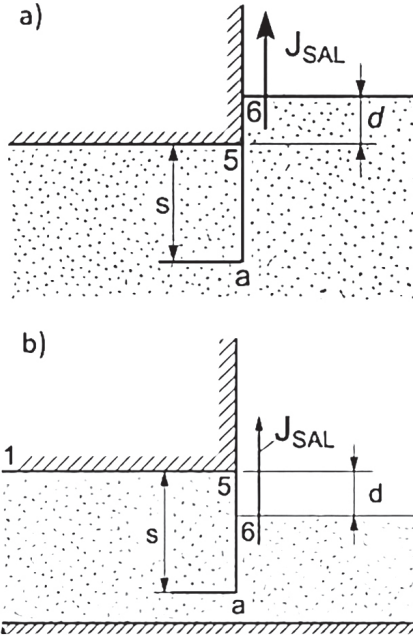


Figura B.16. Para calcular la gradiente piezométrica de salida.
 Fuente: Chugaev, R. R. (1985). *Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado*. AGRO-PROMIZDAT.

B.3.4. Determinación del caudal de filtración

La longitud virtual del contorno subterráneo Λ puede ser expresada a través de la ecuación:

$$\Lambda = T_m \Sigma \zeta \tag{B.73}$$

Considerando esta ecuación, para determinar la magnitud del caudal de filtración q , en correspondencia con la expresión B.60, se puede formular la siguiente expresión:

$$q = \frac{z}{\Lambda} T_m k \tag{B.74}$$

Donde:

T_m : debe ser establecida para la superficie impermeable real.

Para el caso de ubicación muy profunda de la superficie impermeable real, la ecuación B.74, así como la expresión B.60, pueden dar un valor solo aproximado del caudal.

B.3.5. Determinación de la gradiente piezométrica a lo largo de los elementos horizontales del contorno subterráneo

La línea piezométrica P-P construida para los elementos horizontales del contorno se puede identificar a través de J_{hc} (Figura B.2).

Como se conoce del marco teórico general relativo al análisis de la filtración a través de las presas de tierra y de los suelos de cimentación, la resistencia a la filtración es necesario evaluar a través de la magnitud de la gradiente de control J_{gc} . Esta magnitud, siguiendo el método de la línea desarrollada del contorno se determina con la ecuación (Figura B.15b):

$$J_{gc} = \frac{Z}{\Lambda} = \frac{Z}{L+0,88T_m} \quad (\text{B.75})$$

En este caso, para calcular la resistencia a la filtración del suelo de cimentación la magnitud T_m se determina a partir de la superficie de diseño de la capa impermeable encontrada como T'_{DIS} .

B.3.5.1. Ejemplo de cálculo

Dado el esquema de la estructura semejante al del ejemplo de cálculo desarrollado en el segundo numeral (Figura B.14).

La ubicación de las superficies de diseño de las capas impermeables está determinada por las dimensiones $T'_{DIS} = 12,5\text{m}$ y $T''_{DIS} = 25,0\text{ m}$.

B.3.5.1.1. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE SUBPRESIÓN

De conformidad con las ecuaciones B.62 y B.63, las longitudes virtuales de los diferentes elementos del contorno son iguales a:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 0 + \lambda_o = 0 + 0,44(12,5) = 5,5 \text{ m}; \lambda_{1-2} = 5,0 \text{ m} \\ \lambda_{2-3} &= 2(5) = 10 \text{ m}; \lambda_{3-4} = 20 \text{ m} \\ \lambda_{4-5} &= 2(2,5) + \lambda_o = 2(2,5) + 0,44(12,5) = 10,5 \text{ m}\end{aligned}$$

Con los índices en las magnitudes λ se indican los elementos del contorno en correspondencia con la numeración de los puntos del contorno mostrado en la Figura B.14. Como se puede apreciar, el fragmento de resistencia complementaria λ_o es igual a: $\lambda_o = 0,44(12,5) = 5,5 \text{ m}$.

De conformidad con la ecuación B.65, la longitud virtual total del contorno: $\Lambda = L + 2\lambda_o = 5,5 + 5,0 + 10 + 20 + 10,5 = 51 \text{ m}$.

La magnitud de la gradiente piezométrica J_{gc} (Ecuación B.75) es igual a: $J_{gc} = 10/51 = 0,196$.

Las pérdidas de carga en la longitud de los diferentes elementos del contorno son iguales a:

$$\begin{aligned}h_1 &= J_{gc}(\lambda_1) = 0,196(5,5) = 1,08 \text{ m} \\ h_{1-2} &= 0,196(5) = 0,98 \text{ m} \\ h_{2-3} &= 0,196(10) = 1,96 \text{ m} \\ h_{3-4} &= 0,196(20) = 3,92 \text{ m} \\ h_{4-5} &= 0,196(10,5) = 2,06 \text{ m}\end{aligned}$$

A partir de estas pérdidas, en la Figura B.14 está construida la línea piezométrica (línea punteada en la figura). Conociendo la ubicación de la línea piezométrica resulta sencillo encontrar el diagrama de subpresión (Figura B.2, donde este diagrama se muestra con sombreado).

En lo que tiene que ver con el ajuste δ en los extremos de entrada y salida del contorno subterráneo, cabe indicar que este punto se resuelve de igual manera que en el ejemplo de cálculo del segundo numeral.

B.3.5.1.2. DETERMINACIÓN DE LA CARGA EN EL EXTREMO INFERIOR DE LA TABLESTACA DE SALIDA

Este punto se refiere a la Figura B.14b. Aquí, de conformidad con las ecuaciones B.48 y B.50, se obtiene: $h_{ei} = \left(0,8 - 0,3 \frac{2,5}{12,5}\right) 2,06 = 1,53 \text{ m}$.

B.3.5.1.3. DETERMINACIÓN DE LA MÁXIMA GRADIENTE PIEZOMÉTRICA DE SALIDA J_{sal} EN LA SUPERFICIE DEL FONDO AGUAS ABAJO

La longitud virtual de todo el contorno subterráneo, tomando en cuenta que en el caso dado $T''_{DIS}/T'_{DIS} = 2$, puede ser presentada de la siguiente forma: $\Lambda = \Lambda' + 2\lambda_o$, donde Λ' y λ_o son las correspondientes magnitudes encontradas en el primer numeral para la profundidad de diseño de la capa impermeable $T'_{DIS} = 12,5 \text{ m}$.

De conformidad con la ecuación anotada, $\Lambda = 51 + 2(5,5) = 62 \text{ m}$, se tiene:

La longitud virtual del elemento de salida del contorno: $\lambda_{4-5} = 2,25 + 0,44(25) = 16 \text{ m}$.

La pérdida de carga en el elemento de salida del contorno es: $h_{sal} = \left(\frac{10}{62}\right)(16) = 2,58 \text{ m}$

El coeficiente β de conformidad con la ecuación (B.67) es igual a: $\beta = 1,0$.

El coeficiente δ , determinado en la Figura B.8 para $s/T_1 = 0,1$ resulta ser igual a: $\delta = 0,9$.

Introduciendo en la ecuación B.71, un coeficiente de seguridad 1,1 (debido a la considerable profundidad real de la capa impermeable), se obtiene: $J_{sal} = (1,1)(1)(0,9) \left(\frac{2,58}{2(2,5)}\right) = 0,51$.

Se supone que el cálculo del contorno subterráneo desarrollado en este ejemplo puede ser presentado gráficamente (Figura B.15).