

Capítulo 17

Análisis para verificar la estabilidad y resistencia de las presas vertedero a gravedad de hormigón cimentadas en suelo

17.1. Aspectos generales

En los temas anteriores sobre presas ciegas de hormigón a gravedad cimentadas en roca, fueron establecidos los cálculos de estabilidad y resistencia para dicho tipo de presas. En particular fueron discutidos los temas:

- Formulación del perfil teórico triangular de la presa de hormigón, en función del coeficiente de fricción entre la base de la presa y el suelo de cimentación.
- Cálculos de la estabilidad al corte de secciones transversales parciales de la presa así como de las secciones transversales completas de la presa a lo largo de la superficie de contacto con la roca de cimentación; respecto a este punto, en particular fue explicada la razón por la cual en el caso de las presas a gravedad de hormigón no cabe realizar la verificación de la estabilidad al vuelco; además, en los cálculos de la presa al corte el nivel de cálculo del agua en el tramo aguas abajo no necesariamente cabe asumir en las cotas más bajas.
- Estado tensional del cuerpo de la presa y sobre de la resistencia del hormigón a partir de dicho estado tensional; al respec-

to se enfatizó que en el cuerpo de una presa implantada en roca no son permisibles los esfuerzos de tracción.

Adicionalmente, en la aplicación práctica correspondiente al aliviadero de excedentes, fue desarrollado del cálculo a la flotación de una losa de disipación; este cálculo puede ser aplicable para la losa ubicada al pie de la presa vertedero.

17.2. Fuerzas actuantes en una presa vertedero cimentada en suelo

17.2.1. Presión hidrodinámica del agua en el cuerpo de la presa desde el flujo superficial (no de filtración)

Para las presas vertedero pueden haber dos casos diferentes. Aplicando la ecuación de la variación de la cantidad de movimiento al volumen de agua comprendido entre las secciones 1-1 y 2-2 (Figura 17.1b), es posible determinar las componentes horizontal y vertical de la presión hidrodinámica que actúa en la presa de hormigón si las compuertas están abiertas y el agua vierte sobre la presa. La comparación de los componentes mencionados con las fuerzas de presión hidrostática obtenidas para el caso de compuertas cerradas, evidencia que en calidad de escenario de diseño (el de mayor riesgo) cabe asumir el caso mostrado en la Figura 17.1a, es decir, calcular la presa para presión hidrostática.

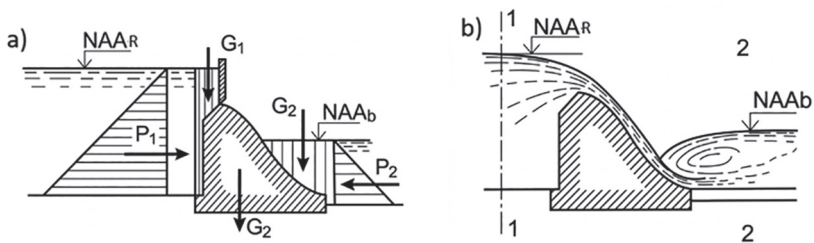


Figura 17.1. Casos de presión hidrostática (a) e hidrodinámica (b) sobre la presa.

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

En algunos casos, para realizar los cálculos estáticos es necesario adicionalmente considerar la presión en los bloques constructivos independientes de la presa proveniente del agua que se encuentra en las juntas de deformación. Esta presión se determina con las ecuaciones usuales de la hidrostática.

17.2.2. Presión hidrodinámica del agua desde el flujo de filtración (subpresión)

Sea por método de los coeficientes de resistencia o por el de la línea del contorno desarrollado (apartado 14.5) se construye la línea piezométrica P-P para el contorno subterráneo de la presa 1-2-3-a-4-5-6 (Figura 17.2).

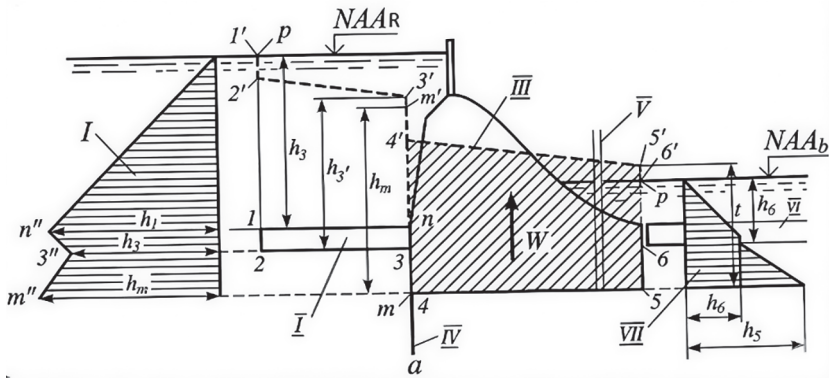


Figura 17.2. Construcción del diagrama I de la presión horizontal del agua (actuante sobre y bajo la superficie del terreno) en la cara superior (aguas arriba) de la presa. I- diagrama; II- carpeta; III- línea piezométrica P-P; IV- tablestaca; V- piezómetro imaginario; VI- losa de disipación; VII- diagrama de la presión horizontal del agua en la cara inferior (aguas abajo) de la presa.

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

La presión hidrodinámica en cualquier punto del contorno subterráneo de la presa se determina con la profundidad de dicho punto bajo el punto correspondiente (punto ubicado en la vertical en la que se encuentra el punto considerado) que pertenece a la línea P-P. La subpre-

sión $W-W$ que actúa en la base 4-5 de la presa se expresa con el trapecio 4-4'-5'-5. Tomando en cuenta lo indicado respecto a la presión del agua en los puntos del contorno subterráneo, fácilmente se construye la línea $n''-3''-m''$, que limita el diagrama de la presión horizontal del agua en el tramo vertical $n-3-m$ del contorno del macizo de hormigón de la presa (Figura 17.2). En forma análoga puede ser construido el diagrama de la presión horizontal del agua que actúa en presa desde el tramo aguas abajo (desde el lado del flujo de filtración).

Es necesario recalcar que la junta que separa de la presa a la losa de disipación es permeable y por esta razón en dicha junta actúa la presión del flujo abierto a la misma que se considera hidrostática.

Las filas de tablestacas de pilotes siempre soportan la acción de la presión horizontal del agua dirigida hacia aguas abajo. Sin embargo, estas fuerzas que surgen debido a la diferencia de presiones del agua sobre la tablestaca, desde sus lados (aguas arriba y aguas abajo), no representan interés.

17.2.3. Presión hidromecánica en el cálculo de una presa con carpeta anclada de hormigón armado

En caso de que el macizo natural de cimentación de la presa se caracterice por tener pequeño ángulo de fricción interna (por ejemplo, un suelo arcilloso) es posible incrementar la estabilidad de la presa al corte con la ayuda de una carpeta anclada de hormigón armado (Figura 17.4). La idea de la carpeta anclada que incrementa la estabilidad de la presa, puede ser aplicada cuando se presente la necesidad de aumentar la estabilidad al corte de otras estructuras, por ejemplo, de los muros de contención. En estos casos, adicional a las fuerzas de presión hidromecánica consideradas líneas arriba, en los puntos 16.2.1 y 16.2.2 es necesario considerar además la presión vertical del agua sobre la carpeta, la misma que se expresa (en el caso más general) con el diagrama IV mostrado en la Figura 17.4; si bajo la carpeta anclada se cuenta con drenaje horizontal, que generalmente es incluido, entonces el diagrama

de presión IV que tiene forma trapezoidal, prácticamente se transforma en rectangular.

Las carpetas ancladas de hormigón armado, en el caso de cimentación arcillosa, constituyen un medio muy efectivo para incrementar la estabilidad de la presa. El diseño de dichas carpetas (su armado y el armado de la base misma de la presa) se basa en la aplicación de métodos especiales de análisis.

17.2.4. Presión del suelo en la presa en el sitio de su enlace con la carpeta

17.2.4.1. La carpeta es permeable

Cuando es construida de suelo arcilloso poco permeable considerando la junta $n - 3$ de enlace de la carpeta con la presa (Figura 17.3). Por cuanto el agua filtra a través de la arcilla entonces la carga a lo largo de la línea $n - 3$ cae de H_n a H_3 (Figura 17.3). La superficie de referencia está identificada como 0-0. La carga se expresa a través de la elevación de la línea de carga (que en el caso dado es la línea piezométrica) sobre la superficie de referencia.

La gradiente piezométrica (hidráulica) a lo largo de la línea $n - 3$ es:

$$i_{n-3} = \frac{(H_n - H_3)}{t} = h_{n-3}/t \quad (16.1)$$

Donde:

t : longitud de la junta $n - 3$ (espesor de la carpeta).

La fuerza de filtración dirigida verticalmente hacia abajo y que actúa sobre $1 m^3$ de la arcilla de la que está constituida la carpeta es igual a:

$$f_f = \gamma_o \frac{h_{n-3}}{t} \quad (16.2)$$

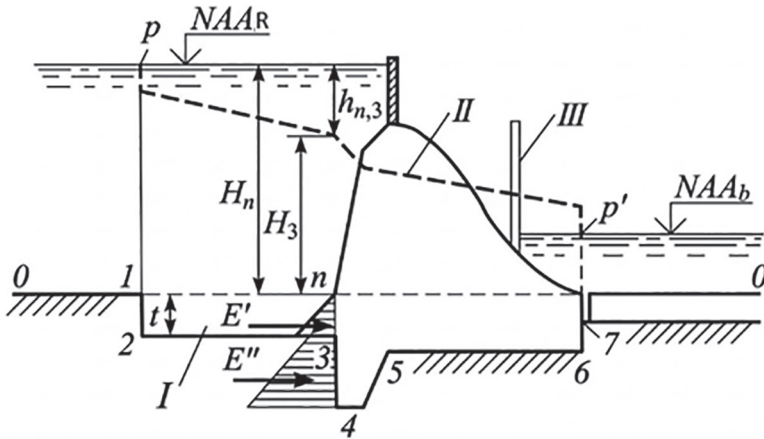


Figura 17.3. Para calcular la presión (empuje) horizontal E' (de la carpeta de arcilla) y E'' (del suelo ubicado debajo de la carpeta de arcilla).

I- carpeta de arcilla; II- línea piezométrica P-P para el contorno subterráneo; III- piezómetro imaginario; 1-2-3-4-5-6-7- contorno subterráneo de la presa.

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

Para el cálculo de la estabilidad de la presa no se considera esta fuerza de filtración, pero en cambio se asume que el peso específico del suelo no es igual a γ_{sum} , sino a:

$$\gamma_{car} = \gamma_{sum} + \gamma_o \frac{h_{n-3}}{t} \tag{16.3}$$

A partir de estas consideraciones se construye el diagrama del empuje activo E' del suelo de la carpeta en el tramo $n - 3$ del contorno de la presa (Figura 16.3).

En lo que respecta al empuje pasivo E'' en la cara de la presa 3-4, este se determina considerando: si el suelo de cimentación está sumergido en agua (aquí las fuerzas de filtración generalmente son despreciadas) y si la superficie del suelo de cimentación 2-3 soporta el peso de la carpeta, cuyo peso específico condicional se determina como se estableció líneas arriba.

17.2.4.2. La carpeta es impermeable

Es fácil observar que la carpeta desde arriba soporta el peso de la columna de agua $1 - P_1 - a - d$; desde abajo en la carpeta actúa la subpresión expresada por la superficie $1 - c - b - d$ (Figura 17.4).

De esta manera, la carpeta considerada resulta estar comprimida hacia el suelo de cimentación por una fuerza que se cuantifica a través de la superficie $P_1 - a - b - c$.

Multiplicando cada ordenada vertical de esta superficie por γ_o (peso específico del agua) se obtiene la carga sobre la superficie de cimentación, con cuya consideración se determina el empuje activo E del suelo que actúa sobre la cara 2-3 de la presa. En este cálculo, al igual que en el primer caso se considera que el suelo de cimentación es sumergido (las fuerzas de filtración son despreciadas).

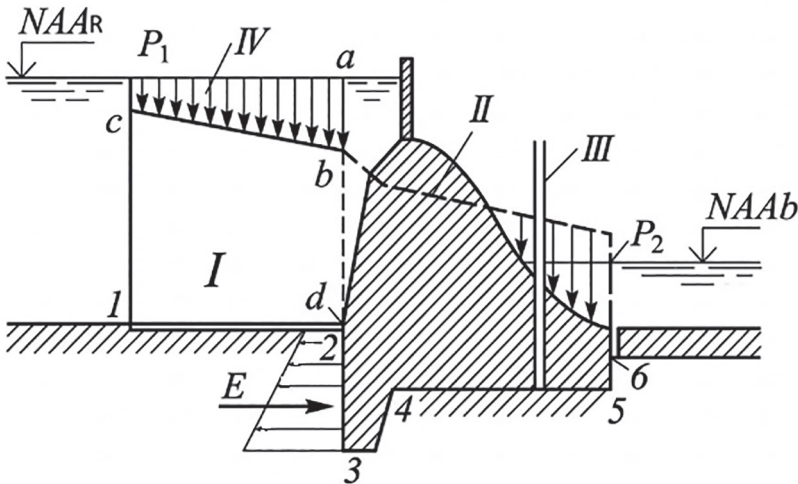


Figura 17.4. Para calcular el empuje horizontal E del suelo de cimentación sobre la cara 2 y 3 de la presa en el caso de carpeta absolutamente impermeable I.

I- carpeta; II- línea piezométrica $P_1 - P_2$; III- piezómetro imaginario; IV- diagrama de la presión del agua en la carpeta; 1-2-3-4-5-6- contorno subterráneo de la presa.

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

17.2.5. Empuje pasivo del suelo en la presa desde el tramo aguas abajo

El empuje pasivo del suelo en la presa desde el tramo aguas abajo se determina bajo el supuesto de que el suelo de cimentación es sumergido (las fuerzas de filtración no se consideran). Además, se considera que la superficie del suelo soporta la carga de la losa de disipación; dicha carga debe ser disminuida en la magnitud de la fuerza de empuje hidrodinámico aplicada sobre la losa (fuerza de Arquímedes).

17.3. Verificación de la estabilidad de la presa vertedero al corte en el contacto con el suelo de cimentación

17.3.1. Aspectos generales

Para verificar la estabilidad de la presa vertedero al corte en el contacto con el suelo de cimentación, ante todo, se formula un esquema simplificado para el cálculo de la sección transversal de la presa, eliminando diferentes detalles que no pueden influir significativamente en los resultados finales del cálculo. No se considera la influencia en la estabilidad de la presa de las filas de tablestacas de pilotes, así como tampoco la resistencia al corte de la losa de disipación en la cual “se apoya” la presa por cuanto dicha losa debe encontrarse en estado muy cercano al estado límite de equilibrio (sin considerar la presión sobre ella desde el lado de la presa).

Generalmente, todas las fuerzas que actúan en la presa son descompuestas en sus componentes horizontal y vertical y de esta manera en adelante se opera únicamente con dos sistemas de fuerzas: horizontal y vertical.

Al ejecutar el cálculo se distinguen escenarios de cálculo tomando en cuenta los valores normativos de los coeficientes o factores de seguridad, las condiciones de trabajo mecánico de las estructuras, las combinaciones de fuerzas para los diferentes escenarios de cálculo, así como también las magnitudes de las correspondientes características, en particular de las de resistencia del suelo de cimentación.

En el análisis al corte de la presa vertedero sobre una cimentación en suelo (así como sobre roca) cabe diferenciar dos casos:

- Se refiere principalmente a cimentación sobre roca. La parte con vertido de la presa está separada de las pilas por las juntas de deformación. En este caso la estabilidad al deslizamiento de las pilas es calculada por separado. En lo que respecta a la parte con vertido de la presa para el cálculo se toma 1 m de longitud de la presa (es decir que se aplica el modelo bidimensional o plano).
- La parte con vertido de la presa no está separada de las pilas. En este caso para el cálculo se toma el bloque constructivo de la presa que incluye dos semipilas, una a cada lado y el tramo de vertido de la presa comprendido entre dichas semipilas.

En el segundo caso se aplica uno de los dos siguientes métodos de cálculo:

- Se realiza el análisis el corte del bloque completo de la presa (se aplica el modelo espacial o tridimensional).
- Se realiza el análisis de corte de 1 m de longitud de la parte con vertido de la presa, tomando en cuenta las siguientes fuerzas: a) las que directamente actúan sobre esta parte; b) las fuerzas adicionales horizontales $P'_x = \frac{P_{xp}}{b_o}$ y las verticales $P'_y = \frac{P_{yp}}{b_o}$, donde P_{xp} es la presión horizontal en la pila básicamente desde el lado de las compuertas y del hielo, en las regiones geográficas con temperaturas negativas), P_{yp} es la diferencia de los pesos de la pila (junto con puentes y mecanismos de maniobra) y del tramo de vertido de la presa de longitud igual al espesor de la pila, y b_o es la longitud del tramo separado de la presa (distancia entre los ejes de las dos pilas vecinas).

Es más cómodo realizar el cálculo con el segundo método por tres razones:

- Condicionalmente se supone que las compuertas no transmiten la presión hidrostática a las pilas sino a la presa, es decir que al analizar el 1 m de longitud de la parte con vertido de la presa se toma en cuenta todo el triángulo de presión hidrostática 1-2-3 (Figura 17.5) más no únicamente el trapecio 1-4-5-3.
- La presión de los objetos flotantes en las pilas se distribuye uniformemente en todo el frente de la presa, es decir, se considera igual a P_{fl} (Figura 17.5).
- Se incrementa el peso del 1m de presa, como fue anotado antes, en la magnitud P'_y .

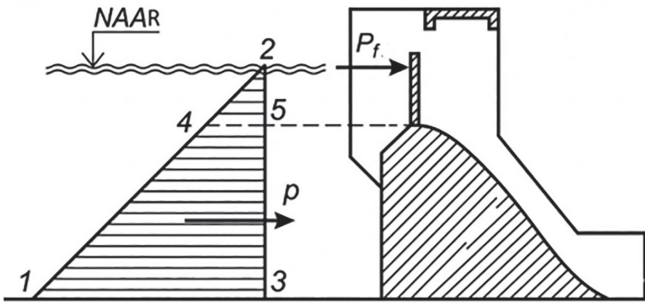


Figura 17.5. Para formular el esquema de fuerzas de cálculo (para analizar la estabilidad de la presa al corte).

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

Al realizar el análisis de estabilidad al corte en el caso de cimentación en suelo se distinguen: el corte de la presa por la superficie horizontal de cimentación y el corte de la presa por alguna superficie que pasa dentro del macizo natural de cimentación, cuando la presa se desliza conjuntamente con algún volumen del suelo de cimentación, es decir se trata de corte con arrastre de dicho suelo.

En caso de contar con una superficie plana de la base de la presa y suelo de cimentación homogéneo la superficie de corte con frecuencia

pasa por la superficie de cimentación (sin arrastre del suelo de cimentación). En este caso el esquema o modelo del cálculo de estabilidad de la presa al corte no se diferencia en nada del esquema o modelo de cálculo de la estabilidad de la presa aplicado para el caso de cimentación en roca.

17.3.2. Corte de la presa sobre la superficie horizontal de cimentación

Como se ha anotado, la pérdida de la estabilidad de una presa de hormigón cimentada en suelo puede tener lugar en el contacto de la base de la presa y el macizo de cimentación (deslizamiento plano) o a lo largo de una superficie de configuración relativamente compleja, ubicada en el interior del macizo de cimentación.

A partir de investigaciones específicas se ha establecido que, si los esfuerzos de contacto normales a la superficie de cimentación no superan determinado valor crítico, el deslizamiento tiene carácter superficial-plano, caso contrario tiene carácter profundo, es decir que se produce en el interior del macizo de cimentación.

Considerando el proceso de deslizamiento de una presa a partir del modelo de deslizamiento de una losa, se puede representar el esquema de carga, a través de una componente longitudinal de fuerzas y una componente vertical (Figura 17.7); la capacidad portante del suelo de cimentación soporta la fuerza vertical a través de los esfuerzos normales σ y la fuerza horizontal a través de los esfuerzos tangenciales τ . La relación de los esfuerzos tangenciales y normales se sujeta a la ley de Coulomb, como se puede apreciar en el gráfico.

Hasta que los esfuerzos normales no superan cierto valor crítico σ_{CRIT} rige la relación lineal con el esfuerzo tangencial. Una vez superado este valor crítico deja de regir la ley mencionada.

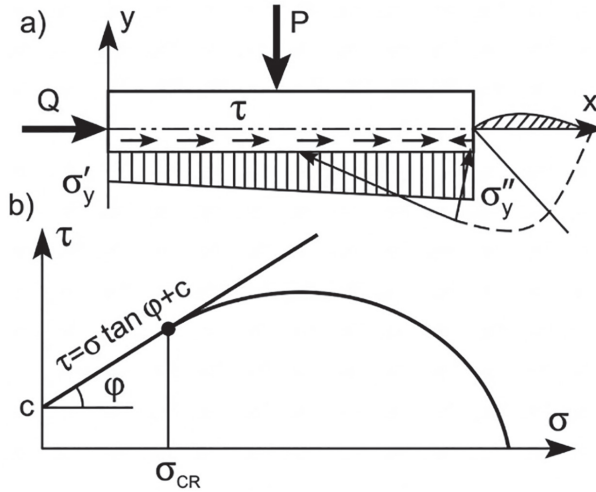


Figura 17.6. Esquema de deslizamiento de una losa.

a- fuerzas actuantes; b- estado crítico.

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

Para determinar el esfuerzo normal crítico existen varios procedimientos, uno de ellos está dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{CRIT} = 2,5 \operatorname{tg} \varphi * B * \gamma_{SUM} + 2c(1 + \operatorname{tg} \varphi) \quad (16.4)$$

Donde:

$\operatorname{tg} \varphi$: ángulo de fricción interna del suelo de cimentación.

B : ancho de la base de la presa (losa).

γ_{SUM} : peso volumétrico del suelo sumergido de cimentación.

c : cohesión específica del suelo de cimentación.

En consecuencia, si se cumple la condición de que el esfuerzo normal máximo σ_{max} en la base de la presa no supera al esfuerzo normal crítico $\sigma_{max} \leq \sigma_{CRIT}$, es suficiente verificar la estabilidad al corte de la presa con el modelo superficial plano a lo largo del contacto de la presa con el suelo de cimentación; caso contrario, cuando $\sigma_{max} > \sigma_{CRIT}$

es necesario, a más de verificar la estabilidad al corte con el modelo superficial plano, adicionalmente, verificar la estabilidad al corte profundo en el interior del suelo de cimentación.

En el caso de análisis al deslizamiento plano se utiliza la ecuación que permite obtener el factor de seguridad al deslizamiento a través de la relación de la suma de fuerzas resistentes a la suma de las fuerzas deslizantes.

$$FSD = \frac{tg\varphi * \Sigma N + cB}{\Sigma T} \quad (16.5)$$

Donde:

ΣN : suma de fuerzas normales a la superficie de deslizamiento.

ΣT : suma de fuerzas deslizantes.

B : ancho de la base de la sección transversal de la presa.

Esta ecuación corresponde al caso cuando la superficie horizontal de deslizamiento coincide con el nivel de cimentación de la presa, es decir con la base de sus dentellones.

17.3.3. Corte de la presa por una superficie al interior del suelo de cimentación (deslizamiento profundo)

En este caso hay tres opciones:

- En presencia de un dentellón superior (aguas arriba) bajo la presa, suficientemente profundo y resistente, el mismo que en caso de deslizamiento de la presa puede arrastrar consigo algún volumen del suelo de cimentación (Figura 17.7).
- En caso de suelo de cimentación no homogéneo, cuando las características de resistencia del suelo a determinada profundidad resultan ser menores que en la superficie.
- Cuando el suelo de cimentación tiene bajos indicadores de corte, por ejemplo, en el caso de arcillas plásticas.

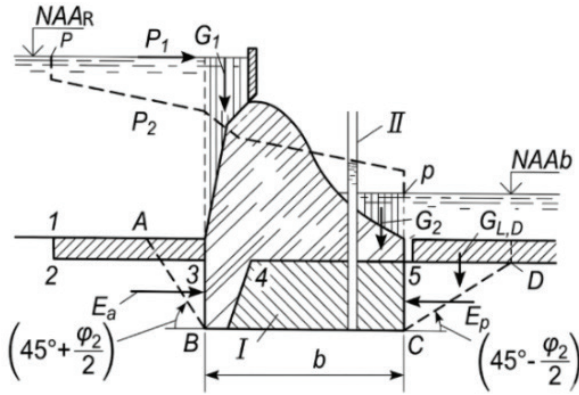


Figura 17.7. Para calcular la estabilidad al corte de una presa por la superficie horizontal BC.

I- suelo que se desliza en conjunto con la presa; II- piezómetro imaginario.

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

En el segundo caso se consideran dos métodos de cálculo de la estabilidad de la presa:

- Relativo únicamente a una presa con dentellón superior (aguas arriba) y suelo de cimentación homogéneo.
- Relativo tanto a presas con dentellón superior (en presencia de suelo de cimentación homogéneo), como a cualquier macizo de cimentación heterogéneo (no homogéneo).

Como se podrá apreciar, aplicando el primer método se asume que la parte principal de la superficie de corte es una superficie plana que pasa por el nivel de la base del dentellón; en el caso del segundo método se utiliza el modelo de cálculo de las superficies cilíndrico-circulares de corte del suelo. El primer método es algo condicional, sin embargo, la práctica demuestra que, con frecuencia, los resultados del cálculo que se obtienen son totalmente coherentes y aceptables.

Al aplicar el segundo método es necesario asumir una serie de superficies de corte del suelo cilíndrico-circulares (que pasan a través

del punto m , Figura 17.8) y como en el caso del análisis de los taludes de tierra, se requiere encontrar la superficie con mayor riesgo de corte que se caracteriza por tener el valor mínimo del coeficiente o factor de seguridad al deslizamiento. Precisamente este coeficiente mínimo se adopta como coeficiente o factor de seguridad de la estabilidad de la presa. En este caso, se asume que la presa es estable si el coeficiente mínimo encontrado no es menor al coeficiente o factor permisible de seguridad al deslizamiento. El segundo método tiene un mejor grado de aproximación; sin embargo, tiene la desventaja que se requiere considerar una serie de superficies cilíndrico-circulares de corte.

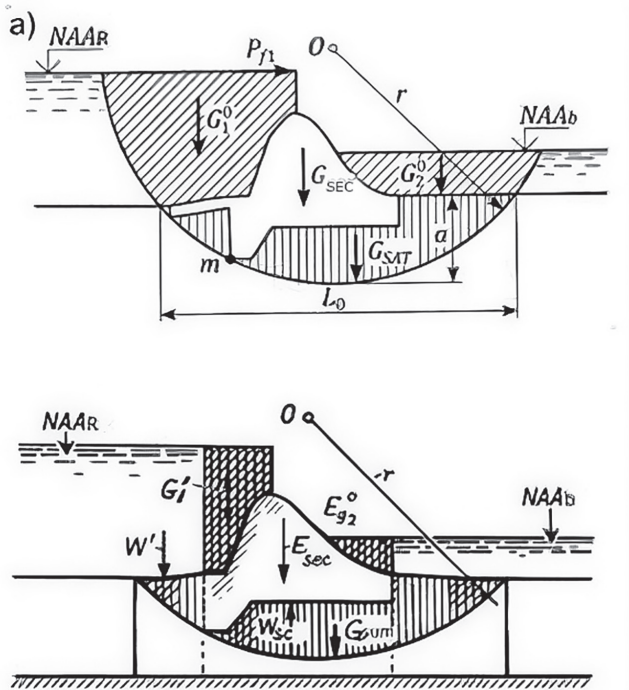


Figura 17.8. Para calcular la estabilidad de una presa por el método de las superficies cilíndrico-circulares de corte.

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

17.3.4. Cálculo de la estabilidad al corte de una presa con dentellón superior profundo (caso de suelo de cimentación homogéneo)

En correspondencia con lo anotado se considera que la superficie de posible falla al corte de la presa está formada por tres superficies: AB , BC y CD (Figura 17.7). La principal parte horizontal de la superficie de corte se considera que es la base de la presa BC y el suelo ubicado sobre dicha superficie (sombreado en la figura) se añade al cuerpo de la presa. En este caso la línea piezométrica P-P que determina la subpresión puede ser construida (en ausencia de drenaje bajo la presa) para el contorno subterráneo condicional 1-2-3-B-C-5, considerando que, en este caso, el peso específico del suelo sombreado (ubicado sobre la línea BC) igual a $\gamma' = \gamma_{sat} \approx 20 \frac{kN}{m^3}$, donde γ_{sat} - peso específico del suelo saturado de agua.

En presencia de drenaje bajo la presa, la línea P-P cabe construir para el contorno subterráneo real o efectivo 1-2-3-B-4-5, suponiendo que el peso específico del suelo ubicado sobre la superficie BC es igual al peso específico de suelo sumergido.

Para simplificar el cálculo de la estabilidad de la presa al corte sobre la superficie horizontal BC de longitud suficiente la verificación de la estabilidad de acuerdo al criterio

$$n_c N_p \leq \frac{m_{pr}}{k_s} R \quad (16.6)$$

Donde:

N_p : fuerzas deslizantes.

R : fuerza límite de resistencia.

n_c : coeficientes de combinación de fuerzas, $n_c = 0,9 \dots 1,0$.

$m_{pr} = 1$: coeficiente de condiciones de trabajo de la presa.

$k_s = 1,1 \dots 1,25$: coeficiente o factor de seguridad.

Es posible determinar con ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$N_p = \sum P_x; R = tg\varphi_I \sum P_y + c_1 b + m_1 E_p \quad (16.7)$$

Donde:

$\sum P_y$: suma de todas las fuerzas verticales activas que actúan en el macizo de hormigón de la presa y el suelo, añadido desde bajo la presa, ubicado sobre la superficie *BC*.

$\sum P_x$: suma de todas las fuerzas horizontales activas que actúan en el macizo de hormigón de la presa y el suelo, añadido desde bajo la presa, incluyendo el empuje activo del suelo E_a que actúa desde la izquierda.

b : ancho de la base de la presa.

c_1 : fuerza específica de cálculo por la cohesión del suelo.

φ_I : ángulo de cálculo de fricción interna del suelo.

E_p : empuje pasivo del suelo (actuante desde la derecha).

m_1 : coeficiente de condiciones de trabajo para E_p .

Al ejecutar el cálculo con la ecuación considerada es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- El empuje pasivo E_p se puede considerar únicamente en el caso de ser permisible alguna deformación de corte de la presa en dirección hacia el tramo aguas abajo. En ocasiones el empuje pasivo no se considera tomando en cuenta la posibilidad de que surja un cono de erosión aguas debajo de la presa.
- En el cálculo del empuje activo del suelo de la carpeta arcillosa sobre la presa se considera la componente vertical de las fuerzas de filtración actuantes en el suelo de la carpeta. Para determinar los empujes activo y pasivo del suelo de cimentación en la presa se desprecian; esta suposición no va en dirección de la seguridad.
- En el caso de presencia de sedimentos acumulados frente a la presa es necesario considerar su empuje sobre la presa.

17.4. Análisis preliminar de resistencia de las presas vertedero cimentadas en suelo

Este análisis incluye la verificación de la ausencia de esfuerzos negativos en la base de la presa y de la capacidad portante del suelo de cimentación.

Los esfuerzos extremos $\sigma_{max} = \sigma_1'' = \sigma_y''$ y $\sigma_{min} = \sigma_2' = \sigma_y'$,⁵ deben satisfacer las siguientes condiciones:

$$\sigma_y'' \leq \sigma_{PER} \quad (16.8)$$

$$\sigma_y' \geq 0 \quad (16.9)$$

Donde:

σ_{PER} : esfuerzo permisible a la compresión del suelo de cimentación (algunos valores referenciales están indicados en la Tabla 16.1).

Como se ha indicado anteriormente, cuando el esfuerzo normal máximo en la base de la presa supera al esfuerzo normal crítico, es necesario realizar a más del análisis al deslizamiento plano, también el análisis al deslizamiento profundo.

Para realizar el análisis al deslizamiento profundo existen métodos especiales que no forman parte del presente curso. Independiente de esto, siempre debe ser verificado si se requiere o no el análisis al deslizamiento profundo, a partir de la condición ya establecida:

$$\sigma_{max} > \sigma_{CRIT} \quad (16.10)$$

5 Estas igualdades obedecen al hecho de que, en los casos de las presas a gravedad cimentadas en suelo, normalmente los paramentos aguas arriba y aguas abajo son verticales en el contacto con la superficie de cimentación, debido a la presencia de dentellones.

En consecuencia, es suficiente el análisis al deslizamiento plano, únicamente cuando se cumpla la condición:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{CRIT} \quad (16.11)$$

Tenemos *tres conclusiones importantes* respecto a los análisis de estabilidad y resistencia de las presas vertedero:

Primero, en todos los casos es necesario verificar la estabilidad del deslizamiento superficial respecto a la superficie plana en la que está ubicada la base de la presa:

$$FSD \geq FSD_{PER} \quad (16.12)$$

Donde:

FSD_{PER} : factor permisible de seguridad al deslizamiento, el mismo que depende del nivel de importancia de la presa y de la combinación de fuerzas:

$$FSD = \frac{tg\varphi * \Sigma N + cB}{\Sigma T} \quad (16.13)$$

Donde:

φ : Ángulo de fricción en el contacto de la presa de hormigón con el suelo de cimentación.

ΣN : suma de fuerzas normales a la superficie de cimentación, incluida la subpresión.

c : fuerza específica de fricción en la superficie de cimentación.

B : ancho de la base de la presa.

ΣT : suma de fuerzas deslizantes, paralelas a la superficie de cimentación.

Segundo, es necesario verificar la estabilidad al deslizamiento profundo en caso de que no se cumpla la siguiente condición:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{CRIT} \quad (16.14)$$

Donde:

σ_{max} : esfuerzo vertical máximo en la base de la presa, que normalmente es igual al esfuerzo vertical al pie de paramento aguas abajo

$$\sigma_{max} = \sigma_y''$$

σ_{CRIT} : esfuerzo crítico que se determina con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{CRIT} = 2,5 \operatorname{tg}\varphi * B * \gamma_{SUM} + 2c(1 + \operatorname{tg}\varphi) \quad (16.15)$$

Donde:

γ_{SUM} : peso específico del suelo de cimentación sumergido.

B : ancho de la base de la presa.

Y tercero, la ausencia de esfuerzos de tracción (esfuerzos negativos) se verifica con la siguiente relación:

$$\sigma_{min} \geq 0 \quad (16.16)$$

Donde:

σ_{min} : esfuerzo mínimo en la base de la presa, el mismo que normalmente es igual al esfuerzo vertical, al pie del paramento aguas arriba de la presa:

$$\sigma_{min} = \sigma_2' = \sigma_y' \quad (16.17)$$

Tabla 16.1
Esfuerzos permisibles a la compresión de suelos.

Denominación del suelo	Esfuerzos permisibles en el suelo, kpa		Observación
	máximo	mínimo	
1. Suelos arcillosos			
Arcillas duras	700	330	Depende de la porosidad
Arcillas plásticas	400	130	Depende de la porosidad
Limos arcillosos duros	400	300	
Limos arcillosos plásticos	330	130	
2. Suelos arenosos			
Limos arenosos poco húmedos	400	330	Depende de la densidad
Limos arenosos húmedos	330	200	
Arenas muy finas poco húmedas	400	350	
Arenas muy finas húmedas	300	250	
Arenas muy finas saturadas	200	150	
Arenas finas poco húmedas	450	300	
Arenas finas húmedas y saturadas	350	200	
Arenas medias independiente de la humedad	500	400	
Arenas gruesas y gravosas independiente de la humedad	650	500	
3. Suelos de granulometría gruesa			
Cantos rodados con arena en los poros	850	850	
Cantos rodados con arcilla en los poros	550	350	Depende de la consistencia de la arcilla
Gravas originadas en rocas cristalinas	700	700	
Gravas originadas en rocas sedimentarias.	400	400	
Los valores de la tabla consideran un ancho mínimo del cimiento no menor a 1 metro y una profundidad de cimentación no menor a dos metros.			