

HIDRÁULICA FLUVIAL

Prof. Ada Moreno Barrios

PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

El procedimiento para el análisis de estabilidad de taludes aquí presentado corresponde a la determinación de la relación entre el esfuerzo cortante y resistente a lo largo de superficies potenciales de falla, realizado por tanteos, hasta llegar a identificar la superficie de falla con menor factor de seguridad. (Flórez, S/A)

1. Dibujar el sistema presa – fundación a escala, junto con toda la información necesaria tales como: alturas características, permeabilidades, curvas granulométricas, ensayos de resistencia, entre otros.
2. Seleccionar la condición de servicio a estudiar. Se recomienda seguir el siguiente orden:
 - a. Fin de la construcción
 - b. Embalse lleno
 - c. Desembalse rápido
 - d. Fin de la construcción + sismo
 - e. Embalse lleno + sismo
3. Colocar en el dibujo todos los elementos a utilizar en la condición de servicio del paso anterior.
4. Trazar la superficie circular de falla a analizar, siguiendo las siguientes recomendaciones:
 - a. Se debe trazar por las fronteras entre los diferentes materiales
 - b. Para el caso embalse lleno, según Lemos (1994), pueden ubicarse las superficies de falla con menor $FS_{actuante}$ haciendo centro sobre el segmento $O'O''$ según se indica en la Figura N° 1:

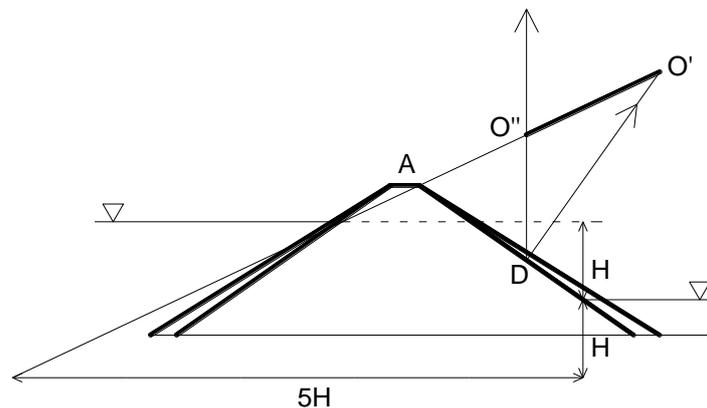


Figura N° 1. Determinación del centro de rotura crítico

5. Dividir en dovelas o “tajadas” la superficie de falla a analizar, cumpliendo con lo siguiente:
 - a. Trazar verticales por donde el círculo cambia de un material a otro.
 - b. Subdividir las secciones del paso anterior en:
 - i. Donde la línea superior de flujo se corte con la superficie circular de falla.
 - ii. Donde el nivel de aguas abajo se intercepte con el talud de aguas abajo del suelo infiltrado.
 - c. Dividir las secciones anteriores en “tajadas” que presenten un ancho constante Δx , siempre y cuando sea posible.



Hidráulica Fluvial

- d. Identificar las “tajadas” sin flujo, con flujo y en estática.
6. Calcular las fuerzas actuantes sobre cada “tajada”.
 - a. Peso de cada “tajada” (Wi)
 - b. Fuerza debida a la filtración, sólo en tajadas **con** flujo (Ubi, Udi, Uii)
 - c. Normal en la base de la “tajada” (Ni)
 - d. Fuerza de sismo (Fsi)
7. Una vez obtenidas las fuerzas, se mide el ángulo θ_i , positivo en la dirección del desplazamiento y negativo en contra del mismo. Igualmente medir el ángulo α' , como el ángulo más externo del talud en estudio.
8. Aplicar los métodos para calcular FSactuante:
 - a. **Casos Sin Sismo:** Método de Bishop modificado

Ecuaciones a utilizar:

$$M\theta_i = \cos\theta_i \left(1 + \frac{tg\theta_i \cdot tg\theta_i}{FS_{supuesto}} \right) \quad (9.49)$$

$$N_i = \left(W_i - U_{bi} \cdot \cos\theta_i - \frac{C_i \cdot \Delta L_i \cdot \sin\theta_i}{FS_{supuesto}} \right) \frac{1}{M\theta_i} \quad (9.48)$$

$$\sigma_i = \frac{N_i}{\Delta L_i} \quad (9.48') \quad F_{S_{calculado}} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot \Delta L_i + N_i \cdot tg\theta_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin\theta_i} \quad (9.52')$$

Procedimiento:

- a.1. Suponer un Factor de Seguridad (FSsupuesto).
- a.2. Suponer, para cada una de las “tajadas” a utilizar, y tomando en cuenta el material de la base de la “tajada”, el ensayo de trabajo para la misma.
- a.3. Para cada una de las “tajadas” calcular $M\theta_i$ según la ec. 9.49.
- a.4. Calcular N_i a partir de la ec. 9.48, para cada una de las “tajadas”.
- a.5. Calcular el $\sigma_{actuante}$ en cada “tajada” a partir de la ec. 9.48’.
- a.6. Comparar el $\sigma_{actuante}$ con $\sigma_{critico}$ y chequear en cuáles “tajadas” no se verifica la suposición hecha en el paso a.2, debiendo cambiar el ensayo supuesto repitiendo el proceso hasta que todas las “tajadas” verifiquen la suposición del paso a.2.
- a.7. Calcular $F_{S_{calculado}}$ a partir de la ec. 9.52’.
- a.8. Comparar el $F_{S_{calculado}}$ con el $FS_{supuesto}$, si son diferentes, volver al paso a.1 y repetir todo el proceso, hasta lograr: **$F_{S_{calculado}} = FS_{supuesto}$** .
- a.9. Comparar el $F_{S_{calculado}}$, el cual pasa a ser $FS_{actuante}$ con el $FS_{admisible}$:
 - a.9.1. Si $FS_{actuante} \geq FS_{admisible}$, talud estable para esta superficie de falla, buscar un nuevo círculo de falla, buscar un nuevo círculo de falla en la misma condición de servicio o iniciar el análisis para una nueva condición de servicio.
 - a.9.2. Si $FS_{actuante} < FS_{admisible}$, existe riesgo de falla, se debe acostar el talud y realizar todo el análisis desde el **paso 1**, desde dibujar nuevamente el sistema presa – fundación, hasta que $FS_{actuante} \geq FS_{admisible}$.

- b. **Casos Con Sismo:** Método del Círculo Sueco Modificado (Analítico)

Ecuaciones a utilizar:

$$C_{Di} = \frac{C_i \cdot \Delta L_i}{FS_{supuesto}} \quad (9.20)$$

$$\phi_{Di} = \arctg \left(\frac{tg\theta_i}{FS_{supuesto}} \right) \quad (9.21')$$

$$\beta_i = 90^\circ - \theta_i + \phi_{Di} \quad (9.26)$$

Hidráulica Fluvial

$$F_{Di} = \frac{W_i - U_{bi}(\cos\beta_i + \sin\theta_i \cdot \text{tga}) - C_{Di}(\sin\theta_i - \cos\theta_i \cdot \text{tga}) - F_{si} \cdot \text{tga} + (U_{di} - U_{ii}) \text{tga}}{\sin\beta_i + \cos\beta_i \cdot \text{tga}} \quad (9.43)$$

$$N_i = F_{Di} \cdot \cos\phi_{Di} \quad (9.33)$$

$$\sigma_i = \frac{N_i}{\Delta l_i} \quad (9.48') \quad E_i = \frac{U_{bi} \cdot \sin\theta_i - (U_{di} - U_{ii}) - C_{Di} \cdot \cos\theta_i + F_{si} + F_{Di} \cdot \cos\beta_i + E_{i-1} \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha} \quad (9.44)$$

Procedimiento:

- b.1. Suponer un Factor de Seguridad (FS_{supuesto}).
- b.2. Comenzando con la “tajada” 1 y dependiendo de la condición de servicio en estudio, suponer un ensayo de trabajo para el material de la base de la “tajada”.
- b.3. Calcular C_{Di} , ϕ_{Di} y β_i a partir de las ecs. 9.20, 9.21' y 9.26.
- b.4. Calcular F_{Di} a partir de la ec. 9.43.
- b.5. Calcular N_i a partir de la ec. 9.33.
- b.6. Calcular σ_i utilizando la ec. 9.48'.
- b.7. Comparar el $\sigma_{calculado}$ en el paso anterior con $\sigma_{critico}$ y verificar si se cumple lo supuesto en el paso b.2, si no verifica la hipótesis se cambia la suposición en b.2 y se repite el proceso, hasta lograr que la suposición en b.2 sea cierta.
- b.8. Calcular E_i a partir de la ec. 9.44.
- b.9. Repetir todo el proceso “tajada” por “tajada” y en forma continua desde el paso b.2 y hasta la última “tajada”.
- b.10. Si E_i de la última “tajada” es diferente de cero, el FS_{supuesto} no es el actuante, suponer un nuevo FS y repetir todo el proceso desde el paso b.1 hasta que el empuje de la última “tajada” sea igual a cero. Si no se logra en ningún momento $E_n = 0$ después del quinto proceso, se hace una gráfica de Empuje vs FS como la que se indica en la Figura Nº 2, y se busca FS para $E_n = 0$.

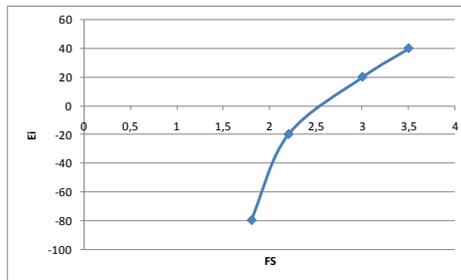


Figura Nº 2. Estimación gráfica del factor de seguridad actuante

- b.11. Cuando $E_n = 0$ el FS_{supuesto} es el FS_{actuante}.
- b.12. Comparar el FS_{actuante} con el FS_{admisible}:
 - b.12.1. Si $FS_{actuante} \geq FS_{admisible}$, el talud es estable, se analiza un nuevo círculo de falla en otra condición, si hace falta.
 - b.12.2. Si $FS_{actuante} < FS_{admisible}$, existe riesgo de falla, se debe acostar el talud y realizar todo el análisis de estabilidad desde el **paso 1**, desde dibujar nuevamente el sistema presa – fundación, hasta que $FS_{actuante} \geq FS_{admisible}$.
9. Una vez analizados todos los círculos de falla en todas las condiciones de servicio, el resultado final corresponde al dique con dimensiones definitivas en donde puede ocurrir lo siguiente:
 - a. Si se está analizando un dique zonificado y los taludes estables encontrados con mayores a los del núcleo máximo correspondiente, se recomienda cambiar el diseño del dique zonificado por dique homogéneo.



Hidráulica Fluvial

- b. Por el contrario, si los taludes encontrados son menores al talud correspondiente al núcleo mínimo, la presa deja de ser zonificada propiamente dicha para convertirse en una zonificada de diafragma.

FACTORES DE SEGURIDAD ADMISIBLES Y ENSAYOS DE SUELOS, PARA LAS DISTINTAS CONDICIONES DE SERVICIO

Condición de servicio	Talud a analizar	Ensayo de corte	Factor de seguridad admisible (FS _{adm})
Fin de la construcción	Ambos taludes	Material permeable: Ensayo "S" Material impermeable: Ensayo "Q"	Presas pequeñas (Z ≤ 15 m) FS = 1,3 Presas grandes (Z > 15 m) FS = 1,4
Desembalse rápido	Talud de aguas arriba	Si $\sigma < \sigma_{cr}$: Ensayo "S" Si $\sigma > \sigma_{cr}$: Ensayo "R"	Desembalse desde el NAMx: FS = 1,0 Desembalse desde el NAN: FS = 1,2
Embalse lleno	Talud de aguas abajo	Si $\sigma < \sigma_{cr}$: Ensayo "S" Si $\sigma > \sigma_{cr}$: Ensayo "(R+S)/2"	Embalse lleno hasta el NAMx: FS = 1,4 Embalse lleno hasta el NAN: FS = 1,5
Fin de la construcción + sismo	Ambos taludes	Material permeable: Ensayo "S" Material impermeable: Ensayo "Q"	FS = 1,0
Embalse lleno + sismo	Talud de aguas abajo	Si $\sigma < \sigma_{cr}$: Ensayo "S" Si $\sigma > \sigma_{cr}$: Ensayo "(R+S)/2"	FS = 1,0

Ensayo "S": Consolidado-drenado

Ensayo "Q": No Consolidado-No drenado

Ensayo "R": Consolidado-No drenado

REFERENCIAS CITADAS

FLÓREZ, I. (S/A). **Obras Hidráulicas**. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela. 493 p.

LEMONS, R. (1994). **Curso Internacional de estructuras hidráulicas aplicado a pequeñas centrales hidráulicas, riego y drenaje. Análisis de estabilidad de taludes en presas flexibles homogéneas**. Universidad del Cauca. Popayán – Colombia.