

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/282336123>

NUEVO MÉTODO DE CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE TALUD, EN BALSAS Y PRESAS, MEDIANTE LA TEORÍA DE MOHR-COULOMB



Conference Paper · June 2005

DOI: 10.13140/RG.2.1.3792.1366

CITATIONS

0

READS

448

5 authors, including:



Emilio Ramirez-Juidias

Universidad de Sevilla

49 PUBLICATIONS 28 CITATIONS

SEE PROFILE



Antonio Miguel Perez-Romero

Universidad de Sevilla

15 PUBLICATIONS 44 CITATIONS

SEE PROFILE



Manuel José León-Bonillo

Universidad de Sevilla

9 PUBLICATIONS 1 CITATION

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Assesing external probe for meteorological data collection to improve high-precision leveling: an application to hydraulic infrastructures (OTR2010-PC36) [View project](#)



Incentivo al Grupo RNM-162 (2010) [View project](#)

NUEVO MÉTODO DE CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE TALUD, EN BALSAS Y PRESAS, MEDIANTE LA TEORÍA DE MOHR-COULOMB [©]

RAMÍREZ JUIDÍAS, Emilio (1); LEÓN BONILLO, Manuel José (2); PÉREZ ROMERO, Antonio Miguel (3); GONZÁLEZ MEDIERO, Miguel Ángel (4); MARTÍNEZ ÁLVAREZ, Rubén (5)

⁽¹⁾Universidad de Sevilla, España
E.U.I.T.A. Departamento de Ingeniería Gráfica
Correo electrónico: erjuideas@us.es

⁽²⁾Universidad de Sevilla, España
E.U.I.T.A. Departamento de Ingeniería Gráfica
Correo electrónico: leonbo@us.es

⁽³⁾Universidad de Sevilla, España
E.U.I.T.A. Departamento de Ingeniería Gráfica
Correo electrónico: tao@us.es

⁽⁴⁾Universidad de Sevilla, España
E.U.I.T.A. Departamento de Ingeniería Gráfica
Correo electrónico: mediero@us.es

⁽⁵⁾Universidad de Sevilla, España
E.U.I.T.A. Departamento de Ingeniería Gráfica
Correo electrónico: rbnmaral@us.es

RESUMEN

Hasta la fecha y para balsas y presas de uso agrícola, se ha venido utilizando, para el cálculo de este coeficiente de seguridad de talud, el método de las fajas de Fellenius, el cual presenta el inconveniente de los numerosos tanteos que hay que efectuar para poder obtener el coeficiente mínimo de seguridad y la ventaja de que es bastante fiable, sobre todo para presas de tipo homogéneo y heterogéneo. Por este motivo se ha decidido buscar un método alternativo que simplifique enormemente el *modus operandi*. Para conseguir dicho objetivo, se ha tomado como base la Teoría de Mohr-Coulomb, la cual resuelve el problema de una forma bastante sencilla.

Palabras clave: Fellenius, Mohr-Coulomb, Balsas, Presas.

ABSTRACT

To date and for rafts and dock of agricultural use, one has come using, for the calculation of this safety factor of slope, the method of the strips of Fellenius, which displays the disadvantage of the numerous rough estimates that there are to carry out for being able to obtain the minimum coefficient of security and the advantage of which he is quite trustworthy, mainly for dock of homogenous and heterogenous type. For this reason it has been decided to look for an alternative method that it simplifies modus operandi enormously. In order to obtain this objective, which has been taken as it bases the Theory of Mohr-Coulomb, solves the problem of a quite simple form.

Key words: Fellenius, Mohr-Coulomb, rafts, Docks.

Grupo temático: Topografía.

1. Introducción

En nuestro País, existe desde hace poco tiempo una creciente demanda en lo que a la construcción de balsas y presas, en el ámbito rural, se refiere. Estas son cada vez más solicitadas, debido a que el medio rural presenta, últimamente, un carácter más abierto en lo referente a la innovación y las nuevas tecnologías, cumpliendo, poco a poco, lo especificado en la Segunda Modernización de Andalucía. Por este motivo, es de crucial importancia, para los Ingenieros Agrónomos y Agrícolas en particular, tener claro los métodos de cálculo de este tipo de obras, para así poder ofertar un servicio más fiable al empresario rural. Entre los diferentes cálculos a realizar, se encuentran el de la capacidad de almacenamiento de agua de la obra, el cálculo de la altura del cuerpo de presa, cálculo del ancho de coronación (a partir del grado sísmico de la zona), cálculo del resguardo del dique (a partir del Fetch Efectivo y de la altura de ola que se puede formar), cálculo del filtro de la presa, cálculo del desagüe de fondo, cálculo de la seguridad al deslizamiento, cálculo de la seguridad al vuelco, cálculo de la seguridad frente rotura del terreno de cimentación y cálculo del coeficiente de seguridad de talud entre otros.

Hasta la fecha y para balsas y presas de uso agrícola, se ha venido utilizando, para el cálculo de este coeficiente de seguridad de talud, el método de las fajas de Fellenius, el cual presenta el inconveniente de los numerosos tanteos que hay que efectuar para poder obtener el coeficiente mínimo de seguridad y la ventaja de que es bastante fiable, sobre todo para presas de tipo homogéneo y heterogéneo. Por este motivo se ha decidido buscar un método alternativo que simplifique enormemente el *modus operandi*. Para conseguir dicho objetivo, se ha tomado como base la Teoría de Mohr-Coulomb, la cual resuelve el problema de una forma bastante sencilla.

2. Desarrollo del Trabajo

El modelo de comportamiento de los taludes de estas obras hidráulicas, en cuanto al equilibrio límite se refiere, está basado en el estudio del equilibrio último de la masa del propio talud supuesta inestable.

Para ello se necesitan establecer, como mínimo, los siguientes supuestos:

- Definir la superficie supuestamente inestable.
- Definir las fuerzas exteriores actuantes.
- Calcular las presiones del agua actuante en la supuesta superficie de rotura.

Con estas condiciones, se establece el equilibrio límite entre las fuerzas que inducen al deslizamiento y las resistentes, determinándose de esta forma la fuerza resultante por resistencia a esfuerzo cortante “**T**” que debe movilizarse a lo largo de la superficie potencialmente inestable en el momento en que se inicia el movimiento. Por ello, el coeficiente de seguridad de la supuesta superficie de rotura lo podemos definir como la relación entre la fuerza resultante de la máxima resistencia a cortante “**R**” disponible realmente a lo largo de dicha superficie y la que es necesario movilizar para el equilibrio estricto:

$$F = R/T \quad \{1\}$$

Siendo “**F**” el coeficiente de seguridad de talud.

2.1 Teoría de Mohr-Coulomb aplicada al cálculo de balsas y presas

Consideremos un punto cualquiera “A” y un plano cualquiera (π) que pasa por él. La tensión actuante sobre este plano tendrá una componente normal “ σ ” y una componente tangencial “ τ ”. La rotura en dicho punto se producirá, lógicamente, cuando la tensión tangencial en un plano alcance cierto valor.

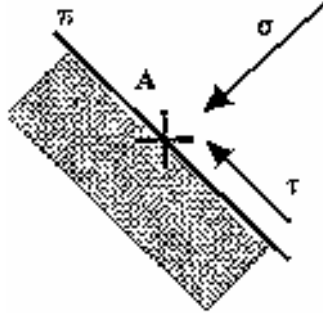


Figura 1. Esquema de tensiones producidas en un elemento interior de suelo.

El criterio de Mohr-Coulomb [1] especifica que la rotura en un plano se produce cuando la tensión de corte alcanza el valor dado por:

$$\tau = c + (\sigma \times \operatorname{tg}\phi) \quad \{2\}$$

siendo:

τ = resistencia al corte del suelo.

c = parámetro que mide la cohesión del suelo, es decir el efecto de la atracción entre partículas.

σ = tensión normal sobre el plano de falla.

ϕ = ángulo de rozamiento interno.

En el caso que nos ocupa, y debido a que el talud aguas arriba del cuerpo de presa se encuentra en condiciones de saturación, el criterio de Mohr-Coulomb se tiene que expresar en función de presiones efectivas, por lo que la ecuación {2} quedaría:

$$\tau' = c' + (\sigma' \times \operatorname{tg}\phi') \quad \{3\}$$

Donde:

c' = cohesión efectiva.

σ' = tensión normal efectiva sobre el plano de rotura.

ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo.

En consecuencia, la rotura en un punto se producirá cuando el círculo de Mohr en tensiones efectivas sea tangente a la línea de resistencia mostrada en la **Figura 2**.

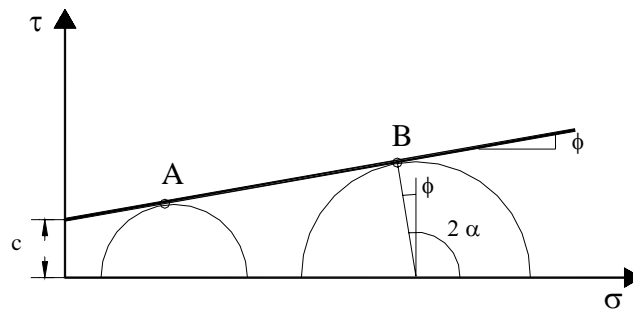


Figura 2. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

La ecuación {2}, se obtiene como consecuencia del principio de Terzaghi, [2] que establece que la presión efectiva es la diferencia entre la presión total y la presión intersticial, y siendo esta última normal a cualquier plano, resulta que las tensiones tangenciales son las mismas en totales que en efectivas, mientras que la presión normal efectiva en un plano es la diferencia entre la presión normal total sobre dicho plano y la presión intersticial. En consecuencia, los círculos de Mohr en totales y en efectivas tendrán el mismo radio, estando desplazado el círculo de Mohr en efectivas (C') respecto al círculo de Mohr en totales (C) hacia la izquierda y con un valor igual a la presión intersticial u .

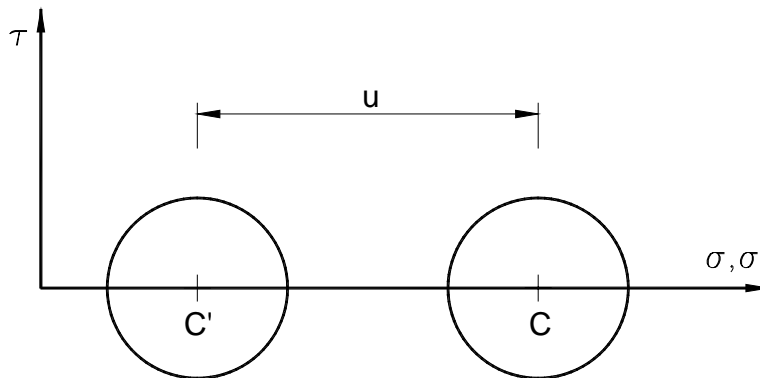


Figura 3. Círculos de Mohr en totales y efectivos.

2.2 Desarrollo del método

Consideremos un talud aguas arriba de una presa cualquiera, la cual presente su nivel máximo de avenida a una altura " h " y un resguardo " r ", de tal forma que la altura total del cuerpo de presa sea:

$$H = h + r \quad \{4\}$$

Supongamos que el ángulo de pendiente del talud aguas arriba es " β ".

Se sabe que en dicho talud, se produce una red de filtración en la sección deformada del dique [3] [4] [5]. Dicha red ejerce su efecto en la parte del talud en contacto con la lámina de agua. Además, sabemos que las líneas de filtración presentan un ángulo de incidencia con el talud de 90° , para luego acabar teniendo una trayectoria parabólica que llegaría hasta el propio filtro de la superestructura.

Tal y como se ha especificado, existen realmente dos zonas a tener en cuenta a la hora de calcular el coeficiente de seguridad de talud. La primera es la que se encuentra en contacto con el agua y en una altura “h”. En esta zona se utilizarán las presiones efectivas para proceder a su cálculo. La segunda es el resguardo “r”, el cual, aunque no se encuentra en todo momento en contacto con el agua, se va a considerar lo contrario para hacer el cálculo desde el punto de vista más desfavorable.

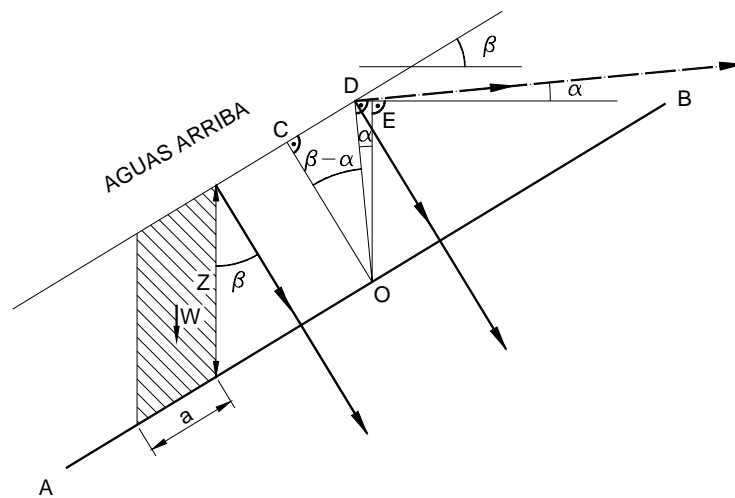


Figura 4. Rebanada tipo y red de filtración en uno de los planos de deslizamiento del talud aguas arriba de la presa.

El proceso de construcción de una presa o balsa, se realiza por tongadas de cierto espesor, cada una de las cuales es compactada. Tras poner la primera tongada y compactarla, se pone la segunda, que también se compacta, y así sucesivamente hasta llegar a la última tongada.

En el proceso de compactación de las tongadas superiores, las inferiores se van asentando cada vez más, por lo que realmente se necesitaría realizar una tensión sobre el plano de rotura mucho mayor para que se tuviera lugar la falla en dicho plano.

Por este motivo, es lógico pensar que la primera tongada tenga un círculo de Mohr mayor que la segunda, y esta a su vez mayor que la tercera,, así hasta llegar a la última, cuyo círculo de Mohr sería el más pequeño de todos.

En cada tongada, se nos presenta entonces un plano de rotura definido por **AB**, tal y como se muestra en la **Figura 4**. Dicho plano se encontrará a una profundidad “z”, y sobre él existirá una rebanada delimitada por dos planos verticales, el de deslizamiento y el de la superficie del terreno.

En estos planos verticales, actuarán unos empujes “E” iguales y de sentido contrario, los cuales serían paralelos al plano de rotura definida por AB. Si consideramos a “W” como el peso de la rebanada, el equilibrio de la misma exige que la reacción en la base sea igual y de sentido contrario al peso. Esta reacción tendrá una componente normal “N” y otra “T” paralela al plano de rotura que se moviliza por resistencia a esfuerzo cortante.

La componente normal total “N” será la suma de la resultante de las presiones efectivas en la base “N” y de la resultante de las presiones intersticiales en la base “U”.

Si tomamos la unidad de longitud en sentido perpendicular a la **Figura 4**, y como peso específico del terreno “γ”, el peso de la rebanada vendrá dado por:

$$W = \gamma \times z \times a \times \cos(\beta) \quad \{5\}$$

Siendo el valor de sus componentes el siguiente:

$$N = W \times \cos(\beta) = \gamma \times z \times a \times \cos^2(\beta) \quad \{6\}$$

$$T = W \times \sin(\beta) = \gamma \times z \times a \times \cos(\beta) \times \sin(\beta) \quad \{7\}$$

Para obtener las tensiones normal “σ” y tangencial “τ”, bastará con dividir respectivamente, las ecuaciones {6} y {7} por el área de la base de la rebanada:

$$\sigma = \gamma \times z \times \cos^2(\beta) \quad \{8\}$$

$$\tau = \gamma \times z \times \cos(\beta) \times \sin(\beta) \quad \{9\}$$

Si consideramos “u” el valor de la presión intersticial en el plano de rotura, de tal forma que la resultante “U” sea constante, y en base al principio de Terzaghi ya expuesto, la tensión máxima tangencial que puede producirse en la base de la rebanada será:

$$\tau_{\max} = c' + (\sigma - u) \times \operatorname{tg} \phi' \quad \{10\}$$

La cual proporciona una fuerza tangencial máxima de:

$$R = a \times (c' + (\sigma - u) \times \operatorname{tg} \phi') \quad \{11\}$$

Sustituyendo dicho valor en la ecuación {1}, nos queda que el coeficiente de seguridad es:

$$F = R/T = [a \times (c' + (\sigma - u) \times \operatorname{tg} \phi')] / T \quad \{12\}$$

Si sustituimos la ecuación {7} y {8} en la {12} y simplificamos, tenemos que:

$$F = [(c' + (\gamma \times z \times \cos^2(\beta) - u) \times \operatorname{tg} \phi')] / [\gamma \times z \times \cos(\beta) \times \sin(\beta)] \quad \{13\}$$

Al existir en el talud de la presa un red de filtración, es preciso determinar el valor de la presión intersticial “u” en el plano de deslizamiento.

Si la filtración fuera rectilínea, cosa que no sucede en la realidad, (en la **Figura 4** aparece dicha filtración como discontinua) esta cortarían a la superficie del talud aguas arriba en el punto “D”.

Si la recta “DO” es la equipotencial que pasa por “D”, debido a que es perpendicular a la supuesta línea de corriente rectilínea, cortaría al plano de rotura en “O”.

Como los puntos “D” y “O” se encuentran sobre la misma equipotencial, se tiene que:

$$h_D = z_D + (u_D / \gamma_w) = h_O = z_O + (u_O / \gamma_w) \quad \{14\}$$

Al estar el punto “D” en la superficie del talud, podemos considerar que la presión intersticial en dicho punto es nula, por lo que la presión intersticial en el punto “O” del plano de rotura es:

$$u_O = (z_D - z_O) \times \gamma_w \quad \{15\}$$

Siendo la diferencia “z_D - z_O”, el segmento “EO” representado en la **Figura 4**, y siendo:

$$EO = DO \times \cos \alpha \quad \{16\}$$

$$DO = CO / \cos (\beta - \alpha) \quad \{17\}$$

$$CO = z \times \cos \beta \quad \{18\}$$

Nos queda que:

$$EO = (z \times \cos \beta \times \cos \alpha) / [\cos (\beta - \alpha)] \quad \{19\}$$

Por lo que la presión intersticial en un punto cualquiera del plano de deslizamiento será, tras sustituir en la ecuación {15} de:

$$u = [(z \times \cos \beta \times \cos \alpha) \times \gamma_w] / [\cos (\beta - \alpha)] \quad \{20\}$$

y si se sustituye en la expresión {13}, obtenemos:

$$F = [c' + \operatorname{tg} \phi' \times (\gamma \times z \times \cos^2 (\beta) - \{(z \times \cos \beta \times \cos \alpha) \times \gamma_w\} / \{\cos (\beta - \alpha)\})] / [\gamma \times z \times \cos (\beta) \times \operatorname{sen} (\beta)] \quad \{21\}$$

Y, por último, como en realidad la red de filtración no es rectilínea, sino perpendicular al talud aguas arriba, resulta que el nuevo $\alpha = (90^\circ - \beta)$, por lo que si sustituimos, simplificamos y tenemos en cuenta todas y cada una de las rebanadas presentes en dicho talud en la anterior ecuación, resulta que el nuevo coeficiente de seguridad queda como sigue:

$$F = \Sigma \left\{ \frac{c'}{\gamma \times z \times \cos(\beta) \times \operatorname{sen}(\beta)} + \operatorname{tg} \phi' \times \left[\frac{1}{\operatorname{tg}(\beta)} \times \cos(2\beta + 90^\circ) - \frac{\cos(90^\circ - \beta)}{\cos(2\beta + 90^\circ)} \right] \right\}$$

3. Conclusiones

Como conclusión final, se puede decir que el presente método reduce, de manera drástica, la dependencia gráfica [6] que presenta el método desarrollado en 1927 por el Ingeniero Sueco Fellenius.

Sin embargo, es preciso realizar una serie de tanteos en lo referente a la profundidad “z” a la que se encuentra el plano de rotura, para así poder obtener el mínimo coeficiente de seguridad que asegure la estabilidad del talud.

Por último decir, que mediante el uso de un programa como el **TAO** se podrían realizar todos los tanteos antes comentados, por lo que tras la introducción en el mismo de los parámetros que forman parte de la fórmula, este daría el mínimo coeficiente de seguridad a utilizar en el cálculo de la obra hidráulica.

4. Desarrollos futuros

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, se procederá a la inclusión en el **TAO** de toda la metodología necesaria para la resolución informatizada de dicho coeficiente de seguridad.

Agradecimientos

Los autores de la presente comunicación agradecen al Coordinador del Departamento de Ingeniería Gráfica en la EUITA de la Universidad de Sevilla, Prof. Titular de Escuela Universitaria Don Andrés Calderón Pedrero, su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Referencias

[1] COULOMB, C.A. *Essai sur une application des regles des maximis et minimis à quelque problèmes de statique relatif à l'architecture*. Memoirs Divers Savants. Academie Science, vol. 7. Paris. 1776.

[2] TERZAGHI, K. *Erdbaumechanik auf bodenphysikaleischer Grundlage*. Deuticke. Viena. 1925.

[3] ESCARIO, V. *Estabilidad de presas de tierra y de escollera*. Laboratorio del Transporte y Mecánica del suelo. Monografía 1. 1966.

[4] IRYDA. *Diseño y construcción de pequeños embalses*. Manuales Técnicos, nº 2. 1985.

[5] VALLARINO, E. *Tratado básico de presas*. Tomos I y II. Edita Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2000.

[6] FELLENIUS, W. *Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen*. W. Emst und Sohn Verlag, Berlin. 1927.