

MECANISMO Y CALCULO DE LA EROSION GENERAL Y LOCAL EN SUELOS NO COHESIVOS, COHESIVOS Y ROCOSOS

TS. E. MIRTJUSLAVA, DR. C. T.

RESUMEN

Sobre la base de la Teoría de la Difusión, se presentan fórmulas para el cálculo de la máxima profundidad de socavación en suelos no cohesivos, cohesivos y rocosos producida por un chorro de caída libre. Basado en investigaciones teóricas, experimentales y de campo, así como en la analogía establecida entre la destrucción de un suelo cohesivo debido a la "fatiga" y la destrucción por la influencia del flujo turbulento en canales, se presenta una solución para problemas de erosión general y local provocada por una caída libre de agua. Estos problemas son: 1. Intensidad de la erosión relacionada con parámetros, del flujo y propiedades del suelo; 2. predicción del tiempo necesario para que se produzca una cierta erosión en un suelo dado; 3. predicción del tiempo necesario para la estabilización de la erosión. Aplicando los métodos de la Teoría de Probabilidades se ha obtenido una solución para el pronóstico del tamaño de la erosión en suelos heterogéneos, no cohesivos y se han establecido las velocidades no erosivas para un flujo de agua, teniendo en cuenta las condiciones naturales del lecho y la granulometría del material. Se brinda una comparación satisfactoria entre los datos de diseño, los de laboratorio e investigaciones de campo.

INTRODUCCION:

Muchos métodos existentes de predicción de la profundidad de erosión dan resultados que a menudo no concuerdan con los obtenidos en observaciones de campo. Esto se debe, a que en general, no se tiene en cuenta la distribución real de velocidades en la depresión producida, así como tampoco la resistencia del suelo a la erosión.

VARIACION DE LA VELOCIDAD AXIAL DEL CHORRO EN EL CONO DE SOCAVACION

La fuerza ejercida por el chorro sobre el fondo y el sedimento de las partículas arrastradas de éste, dependen tanto de las velocidades axiales de la corriente en descenso, como del flujo ascendente. Se han efectuado experimentos que permitieron algunas sugerencias iniciales (1), (2) y nuevas velocidades aproximadas sobre la difusión de una corriente.

La fórmula de la variación de la máxima velocidad axial del chorro descendente es:

$$U_m = \frac{U_{es}}{0,9 + 0,09 \frac{x_1}{b_0} + 0,12 \frac{x_2}{b_0}} \quad (1)$$

La fórmula de la variación de la máxima velocidad axial para el chorro ascendente desde el fondo del cono hasta la superficie libre del agua en éste es:

$$U_a = \frac{U_m}{0,9 + 0,4 \left(\frac{z}{B_0} \right)^2} \quad (2)$$

Los símbolos empleados en las fórmulas (1) y (2) son:

U_{es} : velocidad en la sección de entrada del chorro en el nivel del agua de descarga;

U_m : velocidad máxima del chorro descendente

- b_0 : es el ancho del chorro en la sección de entrada. Para las condiciones naturales, generalmente $b_0 = \frac{0,8 q}{U_{es}}$
- B_0 : es el ancho del chorro a una distancia X de la sección de entrada $B_0 = b_0 + 0,43 x$;
- x_1 : es la distancia, por la trayectoria del chorro, entre la sección de entrada al nivel del agua de descarga y la posición inicial del lecho antes de erosionarse;
- x_2 : es la distancia, por la trayectoria del chorro, entre la posición original del lecho y el fondo del cono de socavación;
- Z : es la distancia, por la trayectoria del chorro ascendente, entre el fondo del cono y la superficie del agua de descarga.

En la figura 1 se pueden apreciar las variables anteriores.

Las pruebas realizadas han confirmado que las velocidades instantáneas máximas y las medias guardan la siguiente relación:

$$\frac{U' \text{ máx}}{U} = \eta = 1,5 \div 2,0$$

El límite inferior ha sido obtenido para experimentos de laboratorio y el límite superior para pruebas de campo.

EROSION LOCAL EN SUELOS NO-COHESIVOS

El proceso de erosión cesa cuando el chorro ascendente y pulsante no es capaz de arrastrar fuera del cono las partículas lavadas del fondo y los lados del mismo, quedando éstas dentro de la hondonada producida. Se concluye entonces que la erosión se detiene cuando la velocidad máxima de la corriente ascendente en la superficie del agua de descarga es igual a la velocidad de sedimentación de aquellas partículas que conforman el cono en un momento dado del proceso erosivo. Teniendo en cuenta el carácter pulsante de las velocidades podemos plantear que:

$$\eta U_a = W \quad (3)$$

donde W es la velocidad de sedimentación de la partícula, pudiéndose calcular (3) por:

$$W = \sqrt{\frac{2 g (\gamma_p - \gamma_o) d_c}{1,75 \gamma_o}} \quad (4)$$

d_c : es el tamaño promedio de aquellas partículas de suelo no cohesivo que componen el fondo del cono en el momento de la estabilización. Ha sido establecido por los experimentos, que el

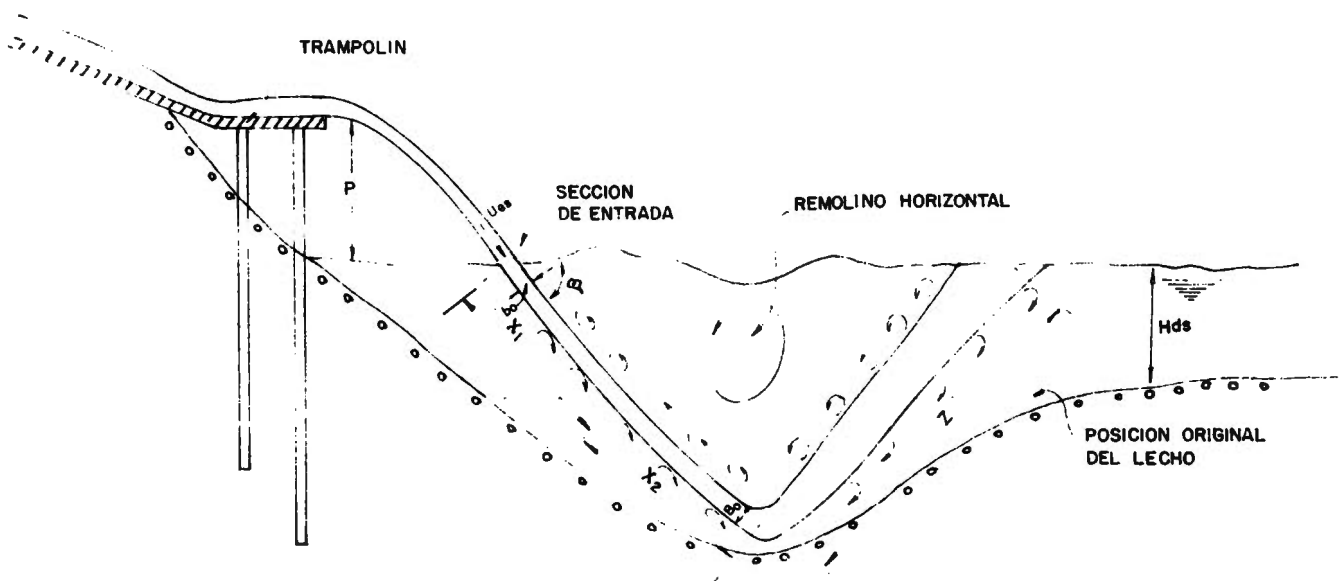


FIG. 1

ESQUEMA DEL CHORRO Y EL CONO DE SOCAVACION

valor del diámetro medio aumenta con el incremento de la profundidad del cono de socavación.

Mientras no se obtenga un conocimiento más amplio de este aspecto es posible tomar en primera aproximación como diámetro característico d_{90} .

- γ_p : peso específico de las partículas.
 γ_o : peso específico del agua aereada. (2)

Basándose en el hecho encontrado en los experimentos en que el eje del chorro ascendente tiene una inclinación respecto a la horizontal aproximadamente igual a la del chorro de entrada, se puede asumir que $X = Z$.

De acuerdo con las investigaciones realizadas la influencia del ángulo de entrada del chorro, en el nivel del agua de descarga sobre la profundidad del cono cuando $\beta \geq 15^\circ$ es:

$$t = \frac{x \operatorname{sen} \beta}{1 - 0,175 \cot \beta} = \frac{(x_1 + x_2) \operatorname{sen} \beta}{1 - 0,175 \cot \beta} \quad (5)$$

Sustituyendo los valores de U_a , U_m en (3) y en (5) y considerando que la profundidad del agua de descarga es H_d s (fig. 1) se obtiene que la máxima profundidad del agua en el cono es:

$$t = \left(\frac{3 \eta U_{es} b_o}{W} - 7,5 b_o \right) \frac{\operatorname{Sen} \beta}{1 - 0,175 \cot \beta} + 0,25 H_d \quad (6)$$

De acuerdo con los resultados experimentales ha sido establecido que la ecuación (6) da resultados mayores para la profundidad de la erosión local en partículas granulares menores de 2 mm.

Esto se puede explicar por el cambio que se produce en el flujo por las condiciones de estas partículas en el instante en que se desprenden, por la disminución de la intensidad de la turbulencia, así como por el brusco descenso de las velocidades de la corriente, de acuerdo con las partículas granulares finas y las bajas velocidades con pequeños números de Reynolds.

Las condiciones del contorno del flujo parecen afectarse por el transporte de los granos finos de arena que se lavan en forma de grupos pulsanter. Sobre la base de datos experimentales la influencia de la combinación de los factores anteriormente mencionados pueden aproximadamente considerarse; se multiplica el primer término

de la fórmula (6) por un coeficiente de condición, el que depende del tamaño de las partículas. Para $d = 2-1 \text{ mm}$ $\eta = 0,6 - 0,4$; $d = 1 - 0,5 \text{ mm}$; $\eta = 0,4 - 0,3$; $d = 0,5 - 0,25 \text{ mm}$ $\eta_1 = 0,2 - 0,1$ y $d = 0,2 - 0,1 \text{ mm}$ $\eta_1 = 0,2 - 0,1$

EROSION LOCAL EN SUELOS COHESIVOS

El chorro al caer provoca la destrucción del terreno en forma de agregados o partículas. El tamaño de estos agregados depende de la textura del suelo, así como de sus propiedades mecánicas y del grado en que las fuerzas "activas" exceden a las "pasivas" y determina la resistencia del suelo a la erosión.

El cono de socavación se estabiliza a partir del momento (2) en que la velocidad axial máxima promedio en el fondo, es igual o menor, que la velocidad permisible en el mismo.

De acuerdo con resultados experimentales y análisis teóricos, considerando los principios de diseño estructural por estados límites, para la estabilidad de los agregados en el fondo del cono se puede establecer la siguiente relación para la velocidad permisible en este.

$$V_{\text{perm cono}} = 1,25 \sqrt{\frac{2 g m}{0,3 \gamma_o \eta} \left[(\gamma_p - \gamma_o) d + 1,25 (C^2 K + P_d + P_H) \right]} \quad (7)$$

La condición necesaria para que cese la profundización del cono es:

$$U_m = V_{\text{perm cono}}$$

Sustituyendo los valores correspondientes en esta relación y con (5) después de simples transformaciones se obtiene la siguiente ecuación para la determinación de la máxima profundidad del agua en el cono de socavación.

$$t = \left(\frac{8,3 V_{es} b_o}{V_{\text{perm cono}}} - 7,5 b_o \right) \frac{\operatorname{Sen} \beta}{1 - 0,175 \cot \beta} + 0,25 H_d \quad (8)$$

donde:

- P_d : presión ejercida por la corriente sobre los agregados arrastrados. Depende de

la velocidad máxima de la corriente en el fondo del cono (U_{con}) :

$$Pd = \frac{1,88 \gamma_o \alpha U^2_{con} \text{ Sen } \beta}{g}$$

P_h : efecto de la presión hidrostática en el contacto entre los agregados.

$$P_h = \alpha \gamma_o t$$

α : es un coeficiente $\alpha = 0,010$

C_r^o : es la resistencia a la ruptura del suelo por "fatiga". Depende de la cohesión en estado de saturación del material. (C)

$$C_r^* = 0,035c$$

K : coeficiente de homogeneidad. Para la generalidad de los suelos:

$$K = 0,5$$

d : es el diámetro de los agregados, aproximadamente 4 mm. (3 ÷ 5 mm)

n, m : coeficientes de sobrecarga y de condiciones de trabajo respectivamente.

El coeficiente η tiene en cuenta el carácter pulsante de las velocidades.

Para las condiciones naturales $n = \eta^2 = 4,0$ y para condiciones de laboratorios $n = \eta^2 = 2,25$, m toma en consideración la influencia de la presencia de sedimentos coloidales en la capacidad erosiva del flujo.

Para flujos sin sedimentos $m = 1,0$ y para flujos con sedimentos $m = 1,6$.

En la fórmula (7) es posible excluir los términos P_d y P_h y establecer el valor de la velocidad permisible en el cono de socavación en función de $V \Delta \text{ perm}$, el valor standard de la velocidad permisible (4).

$$V \Delta \text{ perm}_o = 3V \Delta \text{ perm}$$

(N del T): Para comenzar los cálculos se supone $P_d = P_h = 0$ y se determinan $V \Delta \text{ perm}$ como por (7) y t por (8) en una primera aproximación. Se determinan entonces P_d y P_h con los valores anteriores y se recalculan $V \Delta \text{ perm}$ como y t . Este proceso debe repetirse hasta que se obtengan resultados si-

milares entre dos pasos consecutivos.

EROSION DE LECHOS ROCOSOS

Desde el punto de vista de su estabilidad a la erosión y a la destrucción, los lechos rocosos pueden dividirse en dos grupos.

En el primero tenemos a las rocas agrietadas, es decir, los lechos rocosos divididos por fisuras en partes de diferentes tamaños y donde es despreciable o no existe cohesión.

En el segundo grupo están las rocas agrietadas en las que las fisuras contienen materiales cementantes.

Esta situación posibilita la existencia de cohesión entre las distintas partes fragmentadas.

De los análisis de los procesos de erosión, investigaciones de laboratorios y observaciones naturales se ha llegado a la conclusión que los procesos de erosión son análogos en ambos grupos de rocas, así como, en los suelos cohesivos. El chorro pulsante afecta al lecho dinámicamente causando vibraciones de los agregados de roca. Como resultado de ello la cohesión entre dichos agregados desaparece. Cuando las fuerzas "activas" exceden a las "pasivas" son lavados los fragmentos de rocas inmediatamente.

Esquematisando el fenómeno de la erosión podemos representar un fragmento de roca como un paralelepípedo de dimensiones $a, b, y c$, donde c es la dimensión vertical, y a y b son las dimensiones a lo largo y a lo ancho de la corriente, respectivamente.

Considerando la estabilidad de un agregado en el fondo del cono de socavación, en el momento de estabilización de la erosión, se observa que a las fuerzas dinámicas se opone el peso del agregado en el agua, así como la resistencia a la "fatiga" en caso de que existiera cohesión.

Para la condición límite se obtiene la ecuación que se presenta para la profundidad máxima del agua en el cono de socavación:

$$\tau = \left(\frac{8,3 \text{ Ues} \cdot b_o}{\frac{\sqrt{2 g m b^2 [R_f + C (\gamma_p - \gamma_o)]}}{\gamma_o \eta \text{ Sen } \beta (0,60 b^2 + 0,20 C^2)}} - 7,5 b_o \right) \frac{\text{Sen } \beta}{1 - 0,175 \cot \beta} + 0,25 \text{ Hds} \quad (9)$$

OBRA	TIPO DE SUELO	DIAM. CARACTERÍSTICO (m)	C o Rf (kgf/cm ²)	K (adim.)	q (m ² /s)	P (m)	β (grados)	†		Referencia
								real (m)	calculado (m)	
Aliviadero de la hidroeléctrica Kindoi H. E.	No cohesivo	$d_{90}=0,40$	—	—	14	11,4	30°	6,25	6,88	(5)
Planta de Laboratorio	"	$d_{90}=0,007$	—	—	0,06	2,8	80°	0,5	0,51	Mirtjuslava
Presas vertedora	Lecho rocoso	$a=b=c=2$	—	—	60	17	20°	17,0	16,3	(6)
Planta experimental	"	$a=b=c=0,03$	—	—	0,052	0,36	41°	0,29	0,33	Mirtjuslava
Vertedor con trampolín en Bakurtsikhe	Cohesivo	$d=0,004$	0,11	0,7	4,66	13,0	82°	11,2	11,36	(2)
Planta experimental	"	$d=0,004$	0,2	0,7	0,15	1,25	70°	0,65	0,56	(2)

donde Rf es la resistencia a la ruptura por "fatiga" y se determina en función de la resistencia límite a la compresión obtenida estadísticamente. (4)

(N del T): La expresión (9) es válida para la determinación de la profundidad del agua en el cono cuando el estrato de cálculo es horizontal.

Para un ángulo de buzamiento diferente de cero la expresión será:

$$\tau = \left(\frac{8,3 U_{es} \cdot b_0}{\sqrt{2 g m b^2 [Rf + C (\gamma_p - \gamma_0) \pm \frac{\pm 3c^2 \gamma_p \text{ Sen } \alpha}{b}]} \right) \frac{\text{Sen } \beta}{1,0,175 \text{ Cot } \beta} + 0,25 \text{ Hds}$$

$\gamma_0 \eta \text{ Sen } \beta^2 (0,60b^2 + 0,20 C^2)$

Se toma el signo positivo si los estratos buzan a favor de la corriente.

Rf: se puede obtener multiplicando por 0,0018 la resistencia a compresión de la roca. (10)

a, b, c: dimensiones características de los fragmentos.

A continuación se presenta una tabla en la que se exponen resultados obtenidos por cálculos y

datos de observaciones para diferentes obras y donde se puede apreciar la precisión de las fórmulas propuestas para el cálculo de la máxima profundidad del agua en el cono de socavación con diferentes suelos.

Traducción y adaptación: Juan E. González Fariñas asistente CIH

BIBLIOGRAFIA

- 1— Mikhalev, M.A.: Determination of Erosion Depth of Falling stream in New-Rocky Beds. "Gidrotekhnicheskoe Stroitelstvo" No. 9, 1960.
- 2— Mirtjuslava, Ts.E.: Prognosis of the Deepest Local Scour in Cohesive Materials. "Gidrotekhnicheskoe Stroitelstvo", No. 8, 1965.
- 3— Goncharov, V.N.: Principles of Channel Flow Dynamics, M.L. 1954.
- 4— Mirtjuslava, Ts. E: Instructions on determination of permissible (non-eroding) velocities of water flow for different kinds of soils. Goszemvedkhoz USSR, VSN 2-65.
- 5— Kamonov, I.A.: Channel erosion by freely falling stream. Trudi Gidrologiches kot Laboratori, Sbornik 2, M., 1965.
- 6— Poslavski, V.V.: On erosion of rock bed downstream from spillway dam. Trudi Institute Scrusenii AN Uzbek. SSR, vipuski, 1949.
- 7— Mirtjuslava, Ts. E: Design method of channel deformation "Rechnel Transport", No. 5, 1966.
- 8— Dolidze, I.V.: Determination method of permissible (non-eroding) velocities in field conditions, Veprosi Gidrotekhniki, Tbilisi, 1966.
- 9— Magenodova, A.V.: Graphoanalytical method of scouring design in heterogeus non-cohesive soils: Voprosi Gidrotekhnikii Molievatsii, Tbilisi 1966.
- 10— Serrano Peña, Moisés: Diseño de Trampolines, Trabajo de Diploma para la obtención del título de ingeniero Hidráulico, C.I.H, ISPJAE, 1976.