SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

X CONGRESO NACIONAL

FUNDAMENTOS MECANICOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SUPUESTOS ESFERICOS SIMULANDO GRANULOMETRIA GRUESA Y EXTENDIDA EN LECHOS NATURALES O ARTIFICIALES.

SOLANO VEGA VISCHI*

RESUMEN

Se presentan los fundamentos mecánicos del transporte calculando la velocidad absoluta de cada tamaño de sedimento en función del diámetro esférico equivalente, y de las características del escurrimiento dadas por el radio hidráulico R y la pendiente del plano de carga J.

Se deducen las fórmulas teóricas de la velocidad absoluta de cada tamaño, considerando una partícula aislada colocada sobre una capa base de partículas del mismo diámetro, resultado de la iniciación del movimiento presentado en otro trabajo del autor (VEGA, 1991).

En la misma forma, se presentan las fórmulas teóricas para velocidad absoluta de traslación de partículas de diámetros menores que la capa base.

Los valores de la velocidad absoluta deben ser corregidos tomando en cuenta dos factores. El primer factor K1 corresponde a la trayectoria no recta que debe seguir una partícula esférica sola, que se arrastra sobre una capa base, valor que se determina en este trabajo. El segundo factor K2, que debe ser determinado en forma experimental, es función de varios parámetros tales como intensidad del transporte, rango de variación de los tamaños implicados, factor de forma, etc.

En este trabajo, se ha supuesto un valor K2 con el cual se ha calculado el arrastre para un caso ya analizado con otras fórmulas (VEGA, 1979) y se puede apreciar que los valores obtenidos son comparables a otras fórmulas clásicas cuya base es puramente experimental, tales como las de Schoklitsch y de Meyer-Peter.

---

* Ing. Civil U. de Ch. SOLANO VEGA Y ASOCS. INGENIEROS CONSULTORES.

I.- TRANSPORTE DE UNA PARTICULA ESFERICA COLOCADA SOBRE UNA CAPA FIJA DE PARTICULAS DE IGUAL DIAMETRO.

En Fig. 1, se muestra una partícula esferica de diametro "d", colocada sobre una capa de tamaños iguales a la partícula superior (achurada). Se muestra en esa figura la distribución de velocidades y la notación correspondiente. Se acepta que partícula achurada se desplaza con velocidad absoluta U_y*.

La esfera superior es impulsada por la fuerza de arrastre del escurrimiento (drag), función de la velocidad U_y del escurrimiento, en que "y" corresponde a la altura "h" de la esfera sobre el nivel de estagnamiento (U = 0), y de la velocidad absoluta U_y*. A su vez, la esfera es frenada por la fricción sobre la base que depende del peso sumergido de la partícula, menos las fuerzas de levante (lift), producidas por la presión resultante de la diferencias de velocidades entre hemisferio superior e inferior de la partícula. (VEGA,1991)

Se escribirá la ecuación básica de traslación sin rotación (ya que las partículas no son realmente esféricas).

$$F_D = (F_S - F_L)\tan \Phi \qquad (1)$$

$$F_D = (0{,}20\ \pi d^2/4)(\Upsilon_a/g)U_y'^2/2 = 0{,}008\ \Upsilon\ d_a^2\ U_y'^2 \qquad (2)$$

$$U_y' = U_y - U_y*$$

$$F_L = (\Upsilon_a \pi d^2/4)(U_s - U_i)^2/2g \qquad (3)$$

$$F_D = (\Upsilon_s - \Upsilon_a)\ \pi d^3/6 \qquad (4)$$

Se supone que las esferas estan colocadas en la forma más compacta posible.

En Figs. 2a y 2b se muestra la disposición geométrica de las esferas. De Sección 1-1, se tiene : $d\cos\theta = 0{,}5d/\cos 30^o$

$\therefore$ $\cos\theta = 0{,}5/\cos 30^o = 0{,}577$; $\theta = 54{,}73^o$;

$h = d\,\mathrm{sen}\,\theta = 0{,}816\ d$

$U_y = 5{,}75 \log (30{,}2y / 0{,}5d)U*$ (5);

Fig. 1

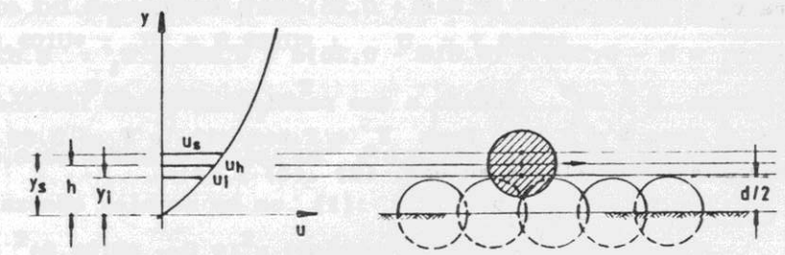


Fig. 2a
PLANTA

Fig. 2 b
SECCION 1-1

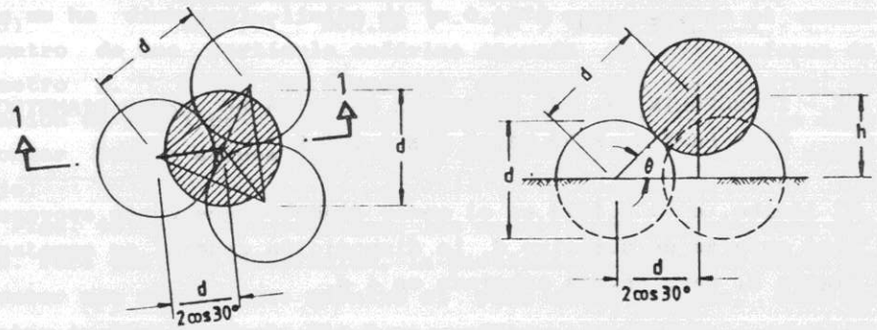
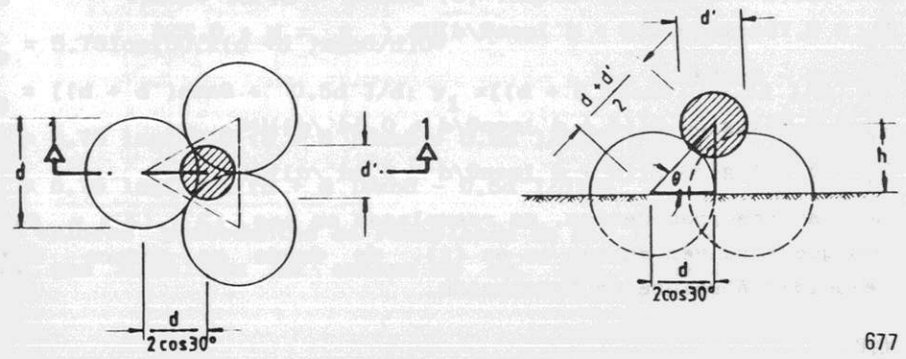


Fig. 3a
PLANTA

Fig 3b
SECCION 1-1



$U^* = \sqrt{gRJ}$; para $y = h = 0{,}816d$: $U_y = 9{,}733U^*$

Para $y_s = h + 0{,}25d = (0{,}816 + 0{,}25)d = 1{,}066d$; $U_s = 10{,}40U^*$

Para $y_i = h - 0{,}25d = (0{,}816 - 0{,}25)d = 0{,}566d$; $U_i = 8{,}82U^*$

Se adopta $\Phi = 30^o$, debido a que partículas están lubricadas por agua, y tang $\Phi = 0{,}577$. Para $\gamma_a = 1$ ton/m3, y $\gamma_s = 2{,}66$ ton/m3, y reemplazando valores en ecs. (2) ,(3) y (4):

$$F_D = 0{,}008d^2(U_y - U_y^*)^2 \qquad (2')$$

$$F_L = 0{,}040\ d^2[(U_s - U_y^*) - (U_i - U_y^*)]^2 = 0{,}040d^2(U_s - U_i)^2 \qquad (3')$$

$$F_S = 0{,}869d^3 \qquad (4')$$

La ec. (1) queda, reemplazando valores :

$$0{,}008d^2(9{,}733U^* - U_y^*)^2 = [0{,}869d^3 - 0{,}040d^2(10{,}40-8{,}82)^2U^{*2}]x0{,}577$$

$$\therefore\ U_y^* = 30{,}47\sqrt{RJ} - \sqrt{62{,}68d - 70{,}56RJ} \qquad (6)$$

II.- TRANSPORTE DE UNA PARTICULA ESFERICA DE MENOR DIAMETRO QUE CAPA BASE D, PERO MAYOR QUE 0,167 D.

El límite $d' = 0{,}167d$ es el menor diámetro que puede apoyarse en tres esferas de diametro d. La disposición general es semejante a figura 1, pero esfera achurada es < d.

En Figs 3a y 3b, se muestra disposición en planta y corte de base y esfera d´. De Sección 1-1, se tiene:

$0{,}5(d + d')\cos\theta = 0{,}5d/\cos 30^o \therefore \cos\theta = d/(d + d')\cos 30^o$

$h = 0{,}5(d + d')\mathrm{sen}\theta$. De Ec. (5) para $y = h$, se tiene:

$U_y = 5{,}75\log[30{,}2(d + d')\mathrm{sen}\theta/d]U^*$; $y_s = h + 0{,}25d$:

$y_i = h - 0{,}25d'$;

$U_s = 5{,}75\log\{30{,}2[(d + d')\mathrm{sen}\theta/d + 0{,}5d'/d]\}U^*$

$U_i = 5{,}75\log\{30{,}2[(d + d')\mathrm{sen}\theta/d - 0{,}5d'/d]\}U^*$

Los valores precedentes, se reemplazan en ecs. (2´),(3´) y (4´), los que a su vez entran en ec (1), de donde se deduce U_y^*, velocidad absoluta de traslación.

Como ejemplo se resuelve caso $d' = 0{,}5d$:

$\cos\theta = 1/1{,}5\cos 30^o = 0{,}7698 \therefore \theta = 39{,}664^o$; $\mathrm{sen}\theta = 0{,}6438$

$U_y = 8{,}401U^*$; $U_s = 8{,}981U^*$; $U_i = 7{,}646U^*$

$F_D = 0{,}008d'^2(8{,}401U^* - U_y^*)^2$

$F_L = 0{,}040d'^2(8{,}981-7{,}646)^2U^{*2} = 0{,}0713d'^2U^{*2}$; $F_S = 0{,}869d'^3$

Reemplazando valores en ec. (1):

$0{,}008d'^2(8{,}401U^* - U_y^*)^2 = (0{,}869d'^3 - 0{,}0713d'^2U^{*2})x0{,}577$

$$\therefore\ U_y^* = 26{,}3\sqrt{RJ} - \sqrt{62{,}68d' - 50{,}40RJ} \qquad (7)$$

III.- TRANSPORTE DE UNA PARTICULA d´ < 0,167 d.

Como se ha dicho, el límite $d' = 0{,}167d$ corresponde al menor diámetro de una partícula esférica apoyada en tres esferas de diámetro d. Para los diametros menores que ese límite, la ecuación de equilibrio no es suficiente, pues la partícula debe remontar cierta altura para poder pasar por dos esferas aguas abajo.

En Figs. 4a y 4b se muestran las condiciones geométricas del caso. Para que haya traslación, la partícula d´ debe ser capaz de remontar una altura que permita el paso entre esferas, como se muestra en Fig. 5. Según Fig 5 se verifica:

$0{,}5(d + d')\cos\theta = 0{,}5\ d \therefore \cos\theta = d/(d+d')$; $h = 0{,}5(d+d')\mathrm{sen}\theta$

Para el punto $y = h$, se tiene:

$F_L = 0{,}04d'^2(U_s - U_i)^2$; $F_D = 0{,}008\ d'^2U_y^2$; $F_S = 0{,}896d'^3$

$U_h = 5{,}75\log[30{,}2(d + d')\mathrm{sen}\theta/d]U^*$

$y_s = [(d + d')\mathrm{sen}\theta + 0{,}5d']/d$; $y_i = [(d + d')\mathrm{sen}\theta - 0{,}5d']/d$

$U_s = 5{,}75\ \log\{30{,}2[(d + d')\mathrm{sen}\theta + 0{,}5d']/d\}U^*$

$U_i = 5{,}75\ \log\{30{,}2[(d + d')\mathrm{sen}\theta - 0{,}5d']/d\}U^*$

Los valores precedentes se reemplazan en ecs. (2´), (3´) y (4´) las que a su vez se entran en ec. (1). Para situación de

Fig 4 a
PLANTA

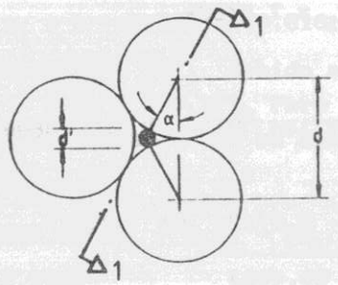


Fig 4 b
SECCION 1-1

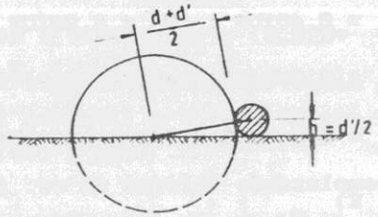


Fig. 5

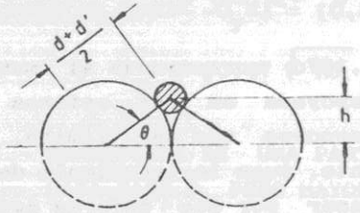
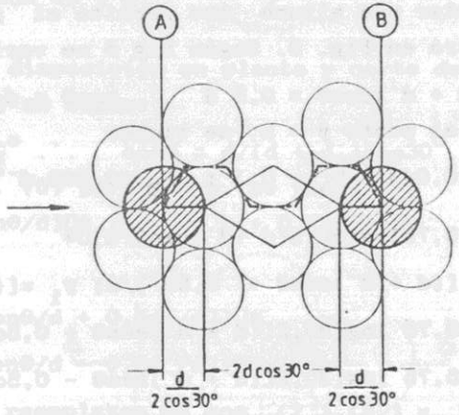


Fig 6



velocidad absoluta de traslación en el piso, la ec.(1) no dá soluciones reales, pues de hecho, la particula tiende a flotar. Esta forma de traslación corresponde a transporte semi-arrastrado y semi-suspendido.

Reemplazando valores en ec. (1) se tiene:

$$U^{*2}\{0,2645[\log 30,2(d+d')\operatorname{sen}\theta/d]^2 + [\log\frac{(d+d')\operatorname{sen}\theta + 0,5d')}{(d+d')\operatorname{sen}\theta - 0,5d')}]^2\} = 0,501d' \qquad (8)$$

La solución por tanteo de ec. (8), dados d, d', y las condiciones de escurrimiento dadas por U*, permite determinar el tamaño mínimo de traslación mixta.

Se acepta que tanto para d' según ec.(8) como para los tamaños inferiores a d', las partículas se mueven con velocidades absolutas calculadas por ec. (1).

IV.- FACTOR DE CORRECION DE VELOCIDADES ABSOLUTAS OBTENIDAS EN SECCIONES I,II Y III.

Con referencia a Fig. 6, la velocidad absoluta calculada U_y* sería la correcta, si el desplazamiento entre secciones A y B fuera una recta en el sentido del escurrimiento, pero habrán dos factores que harán disminuir esa velocidad:

a) La trayectoria seguida por la esfera ubicada inicialmente en A, será por los valles dejados entre las esferas de la capa base, y seguirá un recorrido indicado por la linea segmentada.

<u>Longitud recta entre A y B</u>

$L1 = d\ (1/\cos 30^o + 2\cos 30^o) = 2,887\ d$

<u>Longitud por linea segmentada entre A y B</u>

L2 = 1,5 hexágono circunscrito a círculo d

$L2 = 9\ d\ \tan 30^o = 5,196\ d$

<u>Factor de recorrido k1</u>

$k1 = L1/L2 = 2,887/5,196 = 0,5556$

b) La velocidad será diferente en los tramos paralelos al

escurrimiento, en que $U_1 = U_y$, y los inclinados con respecto al escurrimiento, en 60°, en que $U_2 = U_y \cos 60^o$:

$$k_2 U_y^* = U_y^*(3/7 + 4\cos 60^o/7) = 0{,}7146 U_y^* \quad \therefore \quad k_2 = 0.7146$$

El factor k_2 se designa factor de velocidad. El factor total por el que debe afectarse las velocidades absolutas U_y^*, se designa $K_1 = k_1 x k_2 = 0{,}397$ (9)

Las velocidades de transporte calculadas incluso con su coeficiente de corrección K_1, corresponden a la situación de una sola partícula moviendose sobre el lecho fijo, sin sufrir perturbaciones que no sean las descritas anteriormentes.

Cuando se estan moviendo partículas de diferentes tamaños, como ocurre en lechos con granulometría extendida, los tamaños menores,con mayor velocidad tenderán a ser obstruidos por los mayores que son más lentos, produciendose colisiones y desviaciones, lo que hará que las velocidades efectivas sean menores. Asimismo, se producirán colisiones y desviaciones de las partículas en movimiento con aquellas fijas en el lecho.

Para calcular un segundo coeficiente K_2 que tenga en cuenta estos efectos, deberá obtenerse experimentalmente ese K_2, el que será función entre otras variables, de un parámetro de extensión granulométrica, por ejemplo d90/d10; del factor de forma de las partículas, de la intensidad del transporte, etc.

Obtenido el factor K_2, más el K_1 ya calculado, se pueden aplicar las velocidades reales de transporte de cada tamaño $K_1 K_2 U_y^*$ a la situación de transporte en equilibrio presentado en otros trabajos del autor(VEGA, 1973,1979). Esto permitirá calcular el transporte total arrastrado para cada caudal, conociendo la distribución granulométrica del lecho y las características del escurrimiento R y J.

V.- APLICACION DE CRITERIOS DE ESTE TRABAJO AL CASO DEL RIO MAIPO CALCULADO POR MEDIO DE FORMULAS CLASICAS Y OTRA FORMULA DEL AUTOR. (VEGA ,1971,1979)

De los trabajos del autor mencionados, se han obtenido las Tablas 1 y 2 que se acompañan:

TABLA 1
Características del escurrimiento para río Maipo en Las Melosas.

Q	b	H(R)	U_m	J_m	U*
(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)		(m/s)
12,9	20	0,39	1,65	0,0144	0,235
30,4	27	0,59	1,90	0,0144	0,288
69,4	29,5	0,85	2,77	0,0144	0,346
119,3	31	1,09	3,53	0,0144	0,392
217,1	32	1,42	4,77	0,0144	0,448

TABLA 2
Características granulométricas del lecho

Fraccionamiento tamaños (m)	d_m	Fracción peso tot. P_n	$n_n d_n^3$	$n_n d_n^2$	Socavación h_s(m)
1) 0 -0,003	0,0015	0,10	0,129	86,16	0,008
2) 0,003-0,010	0,0065	0,16	0,207	31,81	0,021
3) 0,010-0,030	0,0200	0,20	0,258	12,92	0,054
4) 0,030-0,100	0,0650	0,24	0,310	4,77	0,150
5) 0,100-0,200	0,1500	0,30	0,338	2,58	0,426

En lo que sigue, se aplicará tentativamente un coeficiente $K_2 = 0{,}30$, con lo que $K^* = K_1 x K_2 = 0{,}397 x 0{,}300 = 0{,}1191$

V.1- Arrastre de sedimentos para Q = 12,9 m3/s

$U^* = 0,235$ (Tabla 1) $U^{*2} = 0,055$

La ecuación que permite calcular el tamaño que acoraza el lecho para este caudal, está dada por ec.(10) (VEGA,1991), que se escribe a continuación:

$$U^{*2}\{0,264 sen\beta[\log(30,2d'/d)]^2 + 0,300 cos\theta cos\beta\} = 0,869 cos\theta cos\beta d' \quad (10)$$

En ec. (10), d´ es el tamaño menor que acoraza el lecho, y d es el tamaño medio del lecho acorazado.

De Sección II en VEGA 1991, se tiene: $sen\theta = d/(d + d')$

$sen\beta = d'/(d + d')$

La Ec. (10) dá por tanteo d´ = 0,020 m, el d resultante de Tabla 2 es d = 0,085 m ; y h_s= 0,054 m. Esto significa que se mueven las fracciones 1) y 2) de Tabla 2.

Se calculan los términos de ec. (1) dados por expresiones (2), (3) y (4). De Sección III de este trabajo de tiene para d´< 0.167 d (fracciones 1) y 2)):

$cos\theta = d/(d + d')$; $y = h = 0,5(d + d')sen\theta$

V.1.1- Fracción 1

d´ = 0,0015 m; d = 0,085 m; $cos\theta = 0,085/0,0865 = 0,983$

$sen\theta = 0,185$; $y = h = 0,5x0,865x0,185 = 0,008$; $y_s = 0,0087$ m

$y_i = 0,0073$ m

$U_y = 5,75 \log(30,2x0,008x2/0,085)U^* = 4,34U^*$

$U_s = 5,75 \log(30,2x0,0087x2/0,085)U^* = 4,55U^*$

$U_i = 5,75 \log(30,2x0,0073x2/0,085)U^* = 4,11U^*$

Sea U_y^* la velocidad teórica absoluta de d´:

$$F_D = 0,008d'^2(U_y - U_y^*)^2 = 0,008d'^2(4,34U^* - U_y^*)^2$$

$$F_L = 0,04d'^2(U_s - U_i)^2 = 0,0077d'^2U^{*2} \; ; \; F_S = 0,869d'^3$$

$F_D = 0,577(F_S - F_L)$; y reemplazando los valores anteriores en F_D:

$$0,008d'^2(4,34U^* - U_y^*)^2 + 0,577(0,0077d'^2U^{*2} - 0,869d'^3) = 0$$

$$\therefore U_y^* = 4,34U^* - \sqrt{62,68d' - 0,56U^{*2}} = 0,78 \text{ m/s}$$

$$K^*U_y^* = 0,1191x0,78 = 0,093 \text{ m/s}$$

$$\Delta q_1 = P_n x h_s x \gamma_s x K^*U_y^* = 0,10x0,054x1,8x0,093 = 0,0009 \text{ton/s/m}$$

V.1.2- Fracción 2

d´ = 0,0065 m; d = 0,085 m; $cos\theta = 0,085/0,0915 = 0,929$

$sen\theta = 0,370$; $y = h = 0,5(d + d')sen\theta = 0,017$ mm;

$y_s = 0,017+0,0016 = 0,0186$ m; $y_i = 0,017- 0,0016=0,0154$m ;

$U_y = 5,75 \log(30,2x0,017x2/0,085) = 6,222U^*$

$U_s = 5,75 \log(30,2x0,0186x2/0,085) = 6,446U^*$

$U_i = 5,75 \log(30,2x0,0154x2/0,085) = 5,975U^*$

$F_D = 0,577(F_S - F_L)$, y reemplazando valores, se tiene $U_y^*=0,95$m/s

$K^*U_y^* = 0,1195x0,95 = 0,113$ m/s

$\Delta q_2 = 0,16x0,054x1,8x0,113 = 0,0017$ ton/s/m

$q_s = 0,009 + 0,0017 = 0,0026$ ton/s/m

$Q_s = 20x0,0026 = 0,052$ton/s; Q_{sd}= 86.400xQ_s = 4.492 ton/día

V.2- Arrastre de sedimentos para Q=69,4 m3/s

$U^* = 0,346$; $U^{*2} = 0,12$

Por tanteo de ec.(10), resulta d´ = 0,065 m; d = 0,11 m.

Resultan las tres primeras fracciones de Tabla 2 en movimiento.

V.2.1- Fracción 1 (d´ < 0.167 d)

d´ = 0,0015 m ; d = 0,11 m; $cos\theta = 0,11/0,1115 = 0,986$;

$sen\theta = 0,163$; $y = h = 0.1115x0,163/2= 0,018$ m

$y_s = 0,018 + 0,0004 = 0,0184$ m; $y_i = 0,018 -0,0004 = 0,0176$ m

$U_y = 5,721U*$; $U_s = 5,776U*$; $U_i = 5,665U*$

$U_y* = 1,68$ m/s; $K*U_y* = 0,1119x1,68 = 0,200$ m/s

$\Delta q_1 = 0,16x0,15x1,8x0,200 = 0,0086$ ton/s/m

V.2.2- Fracción 2 ($d' < 0.167d$)

$d' = 0,065$ m ; $d = 0,11$ m ; $\cos\theta = 0,11/0,1165 = 0,944$;

$\operatorname{sen}\theta = 0,329$; $y = h = 0,1165x0,329/2 = 0,019$ m

$y_s = 0,019 + 0,0016 = 0,0206$ m; $y_i = 0,019 - 0,0016 = 0,0174$ m

$U_y = 5,856U*$; $U_s = 6,058U*$; $U_i = 5,636U*$;

$U_y* = 1,44$ m/s ; $K*U_y* = 0,1191x1,44 = 0,171$ m/s

$\Delta q_2 = 0,16x0,15x1,8x0,171 = 0,0074$ ton/s/m

V.2.3- Fracción 3 ($d' > 0.167$ d)

$d' = 0,020$ m ; $d = 0,11$ m ; $\cos\theta = 0,11/0,13\cos30^o = 0,866$

$\operatorname{sen}\theta = 0,500$; $y = h = 0,13x0,500/2 = 0,0325$ m

$y_s = 0,0325 + 0,005 = 0,0375$; $y_i = 0,0325 - 0,005 = 0,0275$

$U_y = 7,196U*$; $U_s = 7,554U*$; $U_i = 6,779U*$

$U_y* = 1,47$ m/s ; $K*U_y* = 0,1191x1,47 = 0,175$ m/s

$\Delta q_3 = 0,20x0,15x1,8x0,175 = 0,094$ ton/s/m

$q_s = 0,0086 + 0,0074 + 0,0094 = 0,02545$ ton/s/m

$Q_s = 29,5x0,02545 = 0,750$ton/s; Qsd =86.400x0,75 =64.887ton/d

V.3- Arrastre de sedimentos para Q = 119.3 m3/s

$U* = 0,392$; $U*^2 = 0,154$

Por tanteo, utilizando ec. (10), el tamaño mínimo que acoraza el lecho es $d' = 0,100$ m; $d = 0,15$ m. De Tabla 2, interpolando h_s entre $d = 0,065$ m y $d = 0,150$, se tiene

$h_s = 0,41(0,426-0,150) + 0,150 = 0,263$ m.

De acuerdo a ese h_s habría cuatro fracciones granulométricas en movimiento, excluyendo de fracción 4 el tamaño 0,100 m, lo que daría $P_n = 0,20$

V.3.1- Fracción 1

$d' = 0,0015$ m ; $d = 0,15$ m

Si este tamaño vá en suspensión debe verificarse que $F_S \leq F_L$

$0,869d'^3 \leq 0,04d'^2(U_s - U_i)^2$

La altura mínima para ir en suspensión es $y = h = 0,5(d + d')\operatorname{sen}\theta$

$\cos\theta = d/(d + d') = 0,15/0,1515 = 0,990$; $\operatorname{sen}\theta = 0,140$

$y = h = 0,07575x0,14 = 0,0106$ m; $y_s = 0,0106 + 0,0004 = 0,0110$ m

$U_y = 3,623U*$; $U_s = 3,716U*$; $U_i = 3,528U*$; $F_L = 0,0011d'^2U*^2$

$(3,623\ U* - U_y*)^2 + 72,125(0,0011U*^2 - 0,869d') = 0$

$U_y* = 1,14$ m/s ; $K*U_y*$ $0,1191x1,14 = 0,136$ m/s

$\Delta q_1 = 0,10x0,263x1,8x0,136 = 0,0064$ ton/s/m

V.3.2- Fracción 2

$d' = 0,065$ m ; $d = 0,15$ m ; $\cos\theta = 0,15/0,1565 = 0,958$;

$\operatorname{sen}\theta = 0,285$

$y = h = 0,1565x0,285/2 = 0,022$ m

$y_s = 0,022 + 0,0016 = 0,0236$ m

$y_i = 0,022 - 0,0016 = 0,0204$ m

$U_y = 5,447U*$; $U_s = 5,263U*$; $U_i = 5,259U*$

$U_y* = 1,51$ m/s ; $K*U_y* = 0,1191x1,51 = 0,18$ m/s

$\Delta q_2 = 0,16x0,263x1,8x0,18 = 0,0136$ ton/s/m

V.3.3- Fracción 3

$d' = 0,020$ m; $d = 0,15$ m ; $\cos\theta = 0,15/0,17 = 0,882$; $\operatorname{sen}\theta = 0,470$

$y = h = 0,17x0,470/2 = 0,040$ m; $y_s = 0,045$ m; yi = 0,035 m;

$U_y = 6,94U*$; $U_s = 7,234U*$; $U_i = 6,607U*$

$U_y* = 1,68$ m/s ; $K*U_y* = 0,1191x1,68 = 0,200$ m/s

$\Delta q_3 = 0,20x0,263x1,8x0,200 = 0,0189$ ton/s/m

V.3.4- Fracción 4

$d' = 0,065$ m (>0,165 d) ; $d = 0,15$ m ; $\cos\theta = d/(d + d')\cos30^o$

$\cos\theta = 0,805$; $\operatorname{sen}\theta = 0,593$; $h = 0,5(d + d')\operatorname{sen}\theta = 0,063$ m

$y_s = 0,063 + 0,016 = 0,079$ m; $y_i = 0,063 - 0,016 = 0,047$ m

$U_y = 8,075\ U^*$; $U_s = 8,640U^*$; $U_i = 7,343U^*$

$U_y^* = 1,35$ m/s ; $K^*U_y^* = 0,1191x1,35 = 0,16$ m/s

$\Delta q_4 = 0,20x0,263x1,8x0,16 = 0,0151$ ton/s/m

$q_s = 0,0064 + 0,0136 + 0,0189 + 0,0151 = 0,054$ ton/s/m

$Q_s = 31x0,054 = 1,674$ ton/m ; $Q_{sd} = 86.400x1,674 = 144.633$ton/día

V.4- Arrastre de sedimentos para Q = 217,1 m3/s

$U^* = 0,448$; $U^{*2} = 0,200$

Tamaño que acoraza el lecho d´ = 0,15 m. Se mueven las primeras cuatro fracciones.

V.4.1- Fracción 1

d´ = 0,0015 m (< 0,167 d) ; d = 0,15 m ; $\cos\theta = 0,15/0,1515$

$U_y = 3,625U^*$; $U_s = 3,716U^*$; $U_i = 3,528U^*$

$U_y^* = 1,36$ m/s ; $K^*U_y^* = 0,1191x1,36 = 0,162$ m/s

$q_1 = 0,10x0,426x1,8x0,162 = 0,012$ ton/s/m

V.4.2- Fracción 2

d´ = 0,0065 m (<0,167d) ; d = 0,15 ; $\cos\theta = 0,15/0,1565 = 0,958$

$U_y = 5,447U^*$; $U_s = 5,623U^*$; $U_i = 5,259U^*$

$U_y^* = 1,86$ m/s ; $K^*U_y^* = 0,1191x1,86 = 0,222$ m/s

$\Delta q_2 = 0,16x0,426x1,8x0,222 = 0,0273$ ton/s/m

V.4.3- Fracción 3

d´ = 0,020 m (< 0,167 d) ; d = 0,15 m; $\cos\theta = 0,15/0,17 = 0,882$

$U_y = 6,94U^*$; $U_s = 7,234U^*$; $U_i = 6,607U^*$

$U_y^* = 2,10$ m/s ; $K^*U_y^* = 0,25$ m/s

$\Delta q_3 = 0,20x0,426x1,8x0,25 = 0,0383$ ton/s/m

V.4.4- Fracción 4

d´ = 0,065 m (>0,167 d) ; d = 0,15 m ; $\cos\theta = 0,15/0,215x0,866$

$U_y = 8,102U^*$; $U_s = 8,662U^*$; $U_i = 7,369U^*$

$U_y^* = 1,866$ m/s ; $K^*U_y^* = 0,1191x1,866 = 0,222$ m/s

$\Delta q_4 = 0,30x0,426x1,8x0,222 = 0,0511$ ton/s/m

$q_s = 0,012 + 0,0273 + 0,0383 + 0,0511 = 0,1287$ ton/s/m

$Q_s = 32x0,1287 = 4.118$ ton/s; $Q_{sd} = 86.400x4.118 = 355.380$ ton/d

En Fig. 7 se muestran los resultados de los valores obtenidos, dibujados juntos con los resultados de los métodos clásicos que se indican. Se ve que los valores obtenidos por la metodología expuesta, son semejantes a los de Schoklitsch y Meyer - Peter.

REFERENCIAS

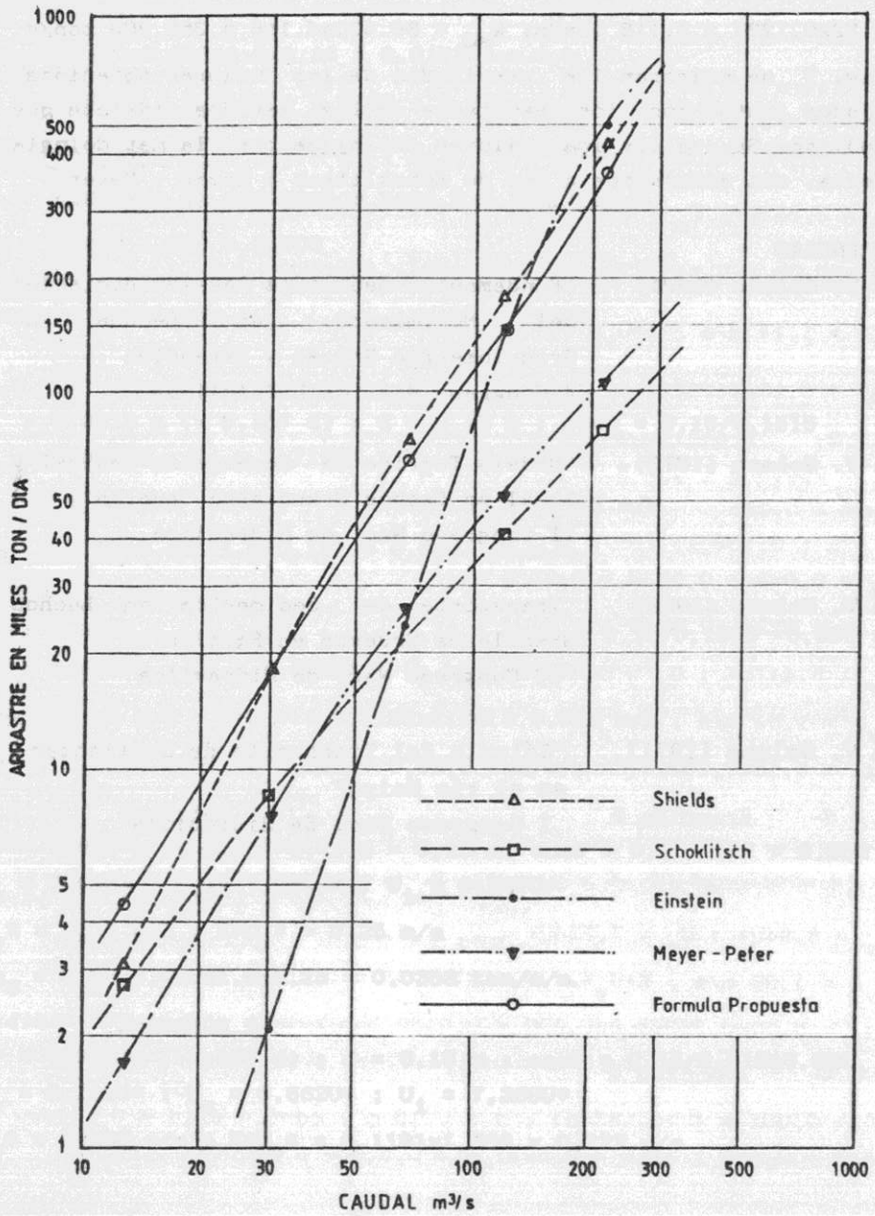
Vega V. Solano (1991) "Fundamentos Mecánicos de la Iniciación del Movimiento en Lechos de Granulometria Gruesa y Extendida". X Congreso Nac. de Hidráulica.

Vega V. Solano (1973) "Modelo Teórico de Socavación General y Local en Lechos Granulares Gruesos" II Congreso Nac. de Hidráulica.

Vega V. Solano (1979) "Transporte de Sedimentos en Lechos Granulares Gruesos en Equilibrio" IV Congreso Nac. de Hidráulica

Vega V. Solano (1971) "Cálculo del Transporte de Sedimentos en el río Maipo" I Congreso Nac. de Hidráulica

Fig. 7



SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

X CONGRESO NACIONAL

FUNDAMENTOS MECANICOS DE LA INICIACION DEL MOVIMIENTO DE PARTICULAS ESFERICAS SIMULANDO GRANULOMETRIA FINA EN LECHOS NATURALES O ARTIFICIALES

SOLANO VEGA VISCHI*

RESUMEN

Se presentan las bases mecánicas puras, en contraposición a criterios exclusivamente experimentales, para la determinación de la iniciación potencial del movimiento. Esto equivale a plantear condiciones de equilibrio límite.

Se puede apreciar, que para partículas esféricas iguales colocadas en una sola capa, estas sobresalen del nivel de estagnamiento una altura de medio diámetro.

El estudio de la rotación potencial sobre las esferas vecinas, para el caso de una esfera colocada en capa simple uniforme, determina un tamaño crítico "d_c" en función de las características hidráulicas del escurrimiento R y J, tal que d_c = 1,18 RJ, a diferencia del valor d_c = 8,65 RJ para granulometria gruesa. (VEGA,1991), lo que se explica por la ausencia de fuerzas ascensionales, como se establece en este trabajo.

Para partícula esférica colocada sobre capa base de esferas del mismo diámetro, se obtiene un tamaño crítico d_c = 37,31 RJ, que es mucho mayor que el propuesto para granulometria gruesa.

Las diferencias entre los valores teóricos aqui presentados para granulometria fina y gruesa son imputables a las diferencias entre el coeficiente de arrastre entre ambos tipos de granos. (0,20 y 0,50 respectivamente) .

Para esferas menores que las de la base, colocadas sobre ésta, las fuerzas tractivas que inician movimiento potencial, aumentan con respecto a la de la esfera de igual tamaño. Esto indica un mayor grado de "anidamiento", y la consiguiente protección ofrecida por las esferas de base.

* Ing. Civil U. de Ch. SOLANO VEGA Y ASOCS. INGENIEROS CONSULTORES.