

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD RELATIVA Y LA DENSIDAD RELATIVA DE LAS PARTICULAS SOBRE LA VELOCIDAD CRITICA DE SEDIMENTOS DISEMINADOS

Julián AGUIRRE, María Luisa OLIVERO
Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes
Mérida, Venezuela
Ramón FUENTES
Laboratorio Nacional de Hidráulica
Caracas, Venezuela

RESUMEN

Se ha realizado un estudio experimental extenso con el fin de cuantificar la eventual influencia de la rugosidad relativa, del peso específico de las partículas y de la razón de diámetros de ellas sobre la velocidad crítica del inicio del arrastre en el caso de partículas aisladas que se han diseminado sobre un lecho compacto. El estudio ha mostrado que la rugosidad relativa influye sobre la velocidad crítica si aquélla es mayor que dos; en forma directa y muy lenta; si es menor que dos su influencia es inversa y fuerte. La densidad relativa de las partículas diseminadas no influye en forma sensible salvo en términos del peso específico relativo sumergido. Por último la velocidad crítica crece cuando la razón de diámetros entre las partículas diseminadas y el lecho compacto decrece, aunque la variación no es fuerte.

ABSTRACT

The influence of relative roughness and density of individual particles on the critical velocity of disseminated sediment. For the threshold of motion of individual particles disseminated over a compact bed of sediment an experimental study has been achieved.

The eventual influence of relative roughness, density of individual particles and ratio of diameters of individual particles and those of the compact bed on the critical velocity have been studied. The results exhibits no influence of density ratio and a little influence of diameter ratio. The relative roughness of the compact bed shows a little and slow influence if is it larger than 2. For little values of the relative roughness, its influence is strong.

INTRODUCCION Y PROPOSITO

El criterio de la velocidad crítica para definir el inicio del arrastre de sedimentos es anterior al de la tensión crítica.

Ya Brahm en 1753 lo había enunciado y DuBuat en 1816 dió cifras concretas para el inicio del arrastre de gravas (1). La relativa preferencia que se observa hacia el criterio de la tensión crítica ha surgido probablemente de que este interviene en casi todas las fórmulas de gasto sólido desde DuBoys. Ahora, el criterio de la velocidad crítica tiene especiales ventajas en el caso en que la rugosidad relativa sea muy alta, ya que en dicha situación el inicio de arrastre no está definido por una tensión crítica sino por un arrastre hidrodinámico individual sobre las partículas. Por otra parte es fácil demostrar que si la rugosidad relativa es baja ambos criterios coinciden.

Casi toda la experimentación vigente ha sido realizada sobre lechos en que el sedimento está colocado en forma compacta, esto es, todas las partículas se tocan unas a otras y la densidad superficial es así la máxima posible. Muy poco se sabe sobre el comportamiento de partículas individuales esparcidas con baja densidad superficial sobre un lecho compacto y este es un caso frecuente para los cantos rodados en ríos de montaña. El propósito de este trabajo es presentar información experimental original precisamente sobre partículas esparcidas, poniendo en evidencia la eventual influencia sobre la velocidad crítica de la densidad de las partículas y la rugosidad relativa. Para este último factor se pondrá énfasis en el caso de rugosidades relativas elevadas, ya que es el caso de ríos de montaña y además está aparentemente poco estudiado hasta hoy.

BASES TEORICAS

Para números de Reynolds suficientemente grandes se tendrá, por consideraciones de análisis dimensional y de equilibrio límite de los granos (Figura N° 1):

$$F_c = \frac{v_c}{\sqrt{\frac{\gamma \Delta d \cos \alpha}{\rho} (\tau_{q\phi} - \tau_{q\alpha})}} = F_c \left(\frac{\gamma_0}{d}, \frac{d_0}{d}, \frac{\rho_p}{\rho}, FF \right) \quad (1)$$

Aquí:

v_c : velocidad crítica

F_c : número de Froude crítico de los granos

- g : aceleración de gravedad
- d : diámetro característico de los granos del lecho compacto
- d_0 : diámetro característico de las partículas diseminadas sobre el lecho compacto
- α : ángulo del canal con la horizontal
- ϕ : ángulo de fricción interna
- y_0 : profundidad (se supone un canal ancho)
- ρ : densidad de las partículas
- ρ_p : densidad del líquido

$$\Delta = \frac{\rho_p}{\rho} - 1 : \text{peso específico relativo sumergido de las partículas}$$

FF : factores que describen la forma de las partículas

Si la pendiente del fondo es baja y ϕ es cercano a 45° , entonces:

$$F_c \approx \frac{V_c}{\sqrt{g \Delta d_0}} \quad (2)$$

y si se amplifica .2. por la velocidad de corte V_{*c} se obtiene:

$$F_c = C_{*c} \tau_{*c}^{1/2} \quad (3)$$

Aquí:

$$C_{*c} = \frac{V_c}{V_{*c}} : \text{coeficiente adimensional de Chézy}$$

τ_{*c} : movilidad de Shields

Si la ley logarítmica fuese aplicable, se obtendría de .3. (Maza y Flores <2>):

$$F_c = \tau_{*c}^{1/2} \left(\frac{1}{\kappa} \text{Log} \frac{y_0}{\alpha d} + B - \frac{1}{\kappa} \right) \quad (4)$$

Aquí:

- κ : constante de Von Kármán ($\kappa = 0.4$)
B : función aditiva, que se hace cercana a 8.5 para canales rugosos anchos
 $\alpha = k_s/d_s$; k_s es la rugosidad de arena equivalente. Por ejemplo, si $d = d_{90}$, α varía entre 2 y 2.5 <12>

Siempre suponiendo que la ley logarítmica sea válida, la ecuación .4. puede escribirse como:

$$F_c = C_1 + C_2 \log \frac{y_0}{d} \quad (5)$$

en donde C_1 C_2 son cercanos a la unidad:

$C_1 = 0.99$	$C_2 = 0.91$	(Shen <3>)
$C_1 = 0.83$	$C_2 = 0.79$	(Montes <4>)
$C_1 = 0.94$	$C_2 = 1.25$	(Maza <2>)

Ahora, ocurre que la ley logarítmica no se cumple si y_0/d es del orden de la unidad, aún en lecho compacto <5>. Por otra parte, para un sedimento esparcido es necesario tomar en cuenta d_0/d ; y por último es de hacer notar que la densidad de las partículas queda bien tomada en cuenta a través de Λ si el inicio del arrastre se refiere al lecho compacto, pero si el inicio del movimiento de los granos es un fenómeno balístico, ρ_0/ρ puede influir separadamente <5>.

INFORMACION EXPERIMENTAL

Sobre las condiciones críticas y la velocidad correspondiente en lecho compacto existe información relativa abundante (ver Maza y Flores <2>). Pero para partículas diseminadas, la información es poca y ha tenido que construirse en base a un trabajo experimental propio. Las características globales de estos trabajos se especifican en el Cuadro N° 1 que va en la página siguiente. Se han incluido allí los trabajos de Neill <6> y de Ashida y Bayazit <7> que fueron realizados para

lecho compacto para fines de comparación ulterior y esta elección se hizo porque ambos bancos de datos contenían valores bajos de y_0/d .

CUADRO Nº 1

AUTOR	Ref. Nº	TIPO LECHO	PARTICULAS DISEMINADAS	DIAMETRO d(mm)	DIAMETRO d ₀ (mm)	γ_s (g/cm ³) LECHO	γ_s (gr/cm ³) PARTIC. DISEM.
AGUIRRE	8	Canal liso	Cubos orientados según la corriente	—	50	—	1,996 ± 6,903
AGUIRRE	9	Canal liso	Cubos a 45° con la corriente	—	50	—	1,996 ± 6,903
AGUIRRE	10	Cantos rodados	Cantos rodados	64	51 ± 83	2,60	2,43 ± 2,75
OLIVERO	11	Gravas	Esfemas	11 ± 23,5	11 ± 29,5	2,62 ± 2,69	2,40 ± 2,54
OLIVERO	11	Gravas	Gravas	11 ± 23,5	11 ± 23,5	2,62 ± 2,69	2,62 ± 2,69
NEILL	6	Gravas y esf.	—	6,2 ± 29,1	—	1,31 ± 2,54	—
ASHDA	7	Gravas y arena	—	6,4 ± 22,5	—	hasta 2,66	—

Así los datos para partículas diseminadas son aquí los de Aguirre <8,9,10> y de Olivero <11>.

RESULTADOS

El efecto de la rugosidad relativa y de la densidad de las partículas sobre F_c puede apreciarse sobre la Figura Nº 2. Pese a que γ_s/γ varía entre 2.0 y 6.9 no se observa efecto apreciable sobre F_c . Se concluye así que no hay efecto balístico sobre el inicio del arrastre.

Por otra parte se ve que y_0/d tiene un efecto muy distinto según si y_0/d es mayor o menor que 2. Para $y_0/d > 2$, la evolución de F_c con y_0/d es lenta y aproximadamente lineal con el logaritmo de (y_0/d) , mostrando así que una relación del tipo .4. es aplicable. Pero si $y_0/d < 2$, F_c varía en forma abrupta; la tendencia es del tipo $F_c \sim d/y_0$; obviamente la ley logarítmica no es válida allí.

La influencia del diámetro del sedimento diseminado respecto al del lecho se observa sobre la Figura Nº 3. Pese a la

dispersión existente puede concluirse que F_c crece cuando d_o/d decrece, lo que aparece razonable, ya que los pequeños valores de d_o/d pueden asimilarse a un escondimiento de los granos. En todo caso la dependencia con d_o/d no es fuerte.

Por último y para tener una idea de conjunto, sobre la Figura N° 3 se han graficado todos los datos. La evolución general de F_c con y_o/d puede interpretarse convenientemente mediante la expresión siguiente, que es una forma corregida de la ecuación 5:

$$F_c = C_1 + C_2 \log \frac{y_o}{d} + C_3 \frac{d}{y_o} \quad (6)$$

Los valores de C_1 , C_2 y C_3 se determinan por mínimos cuadrados empleando los datos de Aguirre <8, 9> y de Neill <6> y posteriormente se retocaron gráficamente. Los valores encontrados fueron:

$C_1 = 1$; $C_2 = 2/3$; $C_3 = 1.2$; los valores de C_1 y C_2 se ven del orden de los discutidos en el punto .2. La curva resultante se observa sobre la Figura N° 4.

En términos globales puede decirse que los sedimentos diseminados tienen valores de F_c que no se alejan de los correspondientes a un lecho compacto si d_o/d es cercano a la unidad.

CONCLUSIONES

Un estudio experimental extenso sobre la influencia de la rugosidad relativa y_o/d , la densidad relativa γ_s/γ y la razón de diámetros d_o/d sobre la velocidad crítica de inicio del movimiento para sedimentos diseminados sobre un lecho compacto muestra que:

- F_c varía fuertemente con y_o/d si esta razón es menor que dos; la variación es del tipo $F_c \sim d/y_o$. Para los valores elevados de y_o/d , F_c varía lentamente, aproximadamente con $\log (y_o/d)$.

- F_c no varía en forma sensible con γ_s/γ , aunque este parámetro varíe entre 2 y 7.

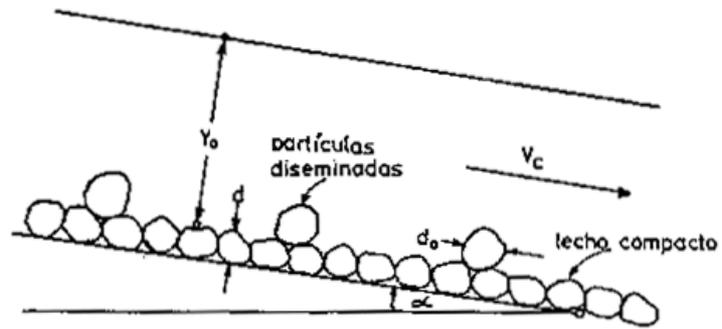


FIGURA 1

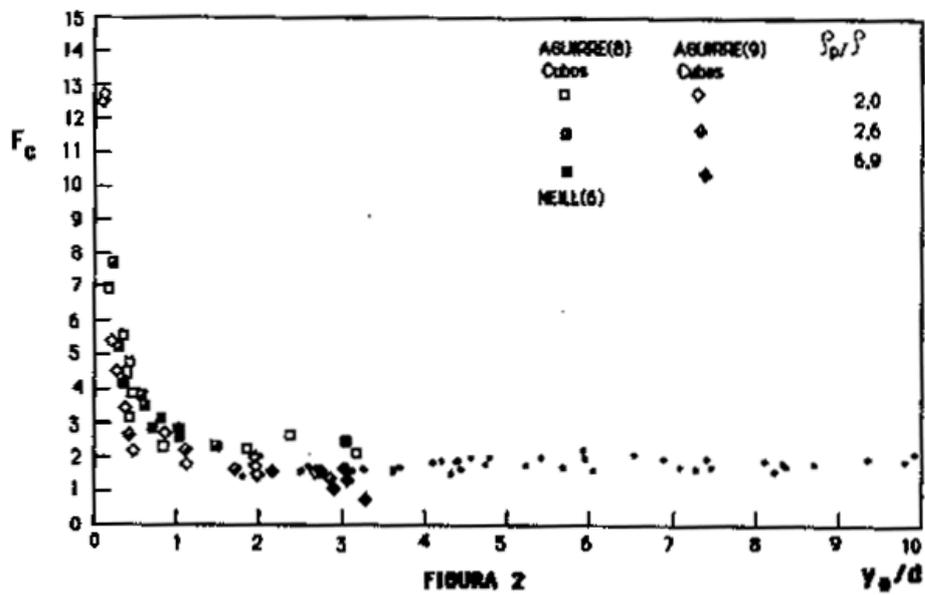
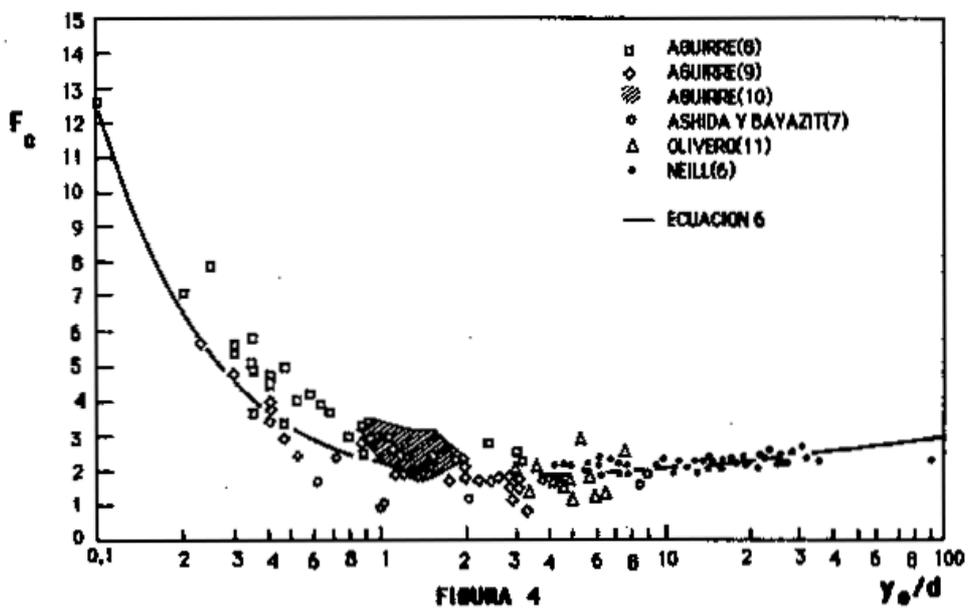
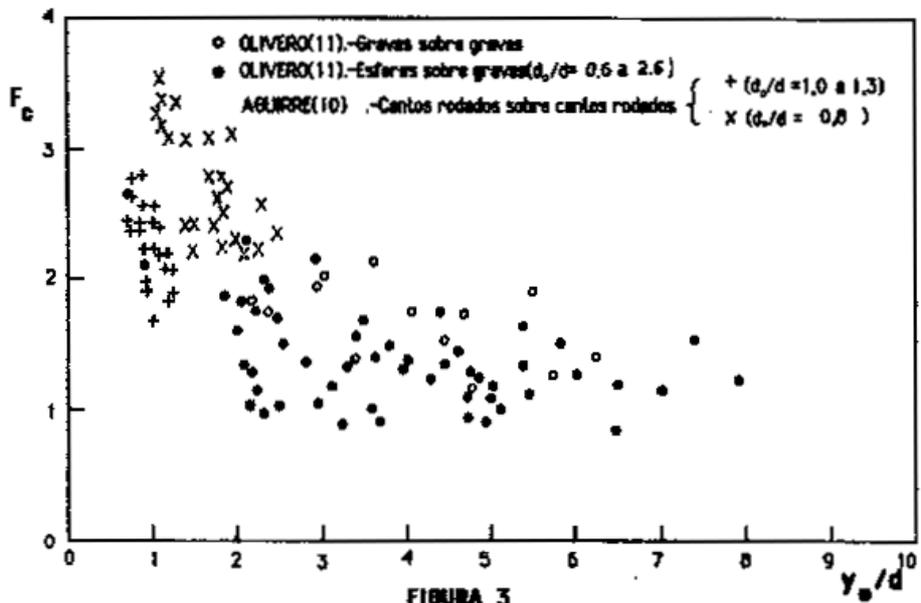


FIGURA 2



- F_c aumenta lentamente con d_o/d ; para d_o/d cercanos a la unidad, no hay una diferencia importante con el valor de F_c para un lecho compacto.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló dentro del marco de un Convenio suscrito entre la Universidad de Los Andes y el Laboratorio Nacional de Hidráulica de Venezuela. El CDCHT de la ULA proporcionó financiamiento a través del Proyecto I-204.

REFERENCIAS

- <1> FORCHHEIMER P.H.; "Tratado de Hidráulica", 3 Edición, Ed. Labor, Buenos Aires, Argentina (1939)
- <2> MAZA ALVAREZ J.A. Y FLORES M.; "Velocidades Medias para el Inicio del Movimiento de Partículas", VIII Congreso Latinoamericano de la AIIH, Quito, Ecuador, Octubre (1978)
- <3> SHEN H.W. y GESSLER, J; "General Report on Papers C1 to C9", XII Congress of IAHR, Fort Collins, Colorado, USA Septiembre (1967)
- <4> MONTES S.; "Velocidad Crítica de Arrastre de Sedimentos", Laboratorio de Hidráulica, Universidad de Chile, Inédito (1968)
- <5> YALIN M.S.; "Mechanics of Sediment Transportation", 2a Edición, Pergamon Press (1977)
- <6> NEILL C.R.; "Mean-Velocity Criterion for Scour of Coarse Uniform Bed-Material", XII Congress of IAHR, Fort Collins, Colorado, USA, Septiembre (1967)
- <7> ASHIDA K. y BAYAZIT M.; "Initiation of Motion and Roughness of Flow in Steep Channels", XV Congress of IAHR, Estambul, Turquía, (1973)
- <8> AGUIRRE J.; "Incipient Erosion in High Gradient Open Channel Flow with Artificial Roughness Elements", XVI Congress of IAHR, Sao Paulo, Brasil (1975)
- <9> AGUIRRE J.; "Arrastre de Sedimentos Gruesos en Ríos Tormentosos de Gran Pendiente", Informe Inédito, Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, Septiembre (1975)

- <10> AGUIRRE J.; "Fricción y Tensión Crítica en Gravas", Informe Inédito, Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela (1984)
- <11> OLIVERO M.L.; "Movimiento Incipiente de Partículas en Flujo Torrencial", Trabajo de Ascenso a Profesor Asociado, Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, Julio (1984)
- <12> KAMPHUIS J.W.; "Determination of Sand Roughness for Fixed Beds", J.H.R. 12, N° 2, (1974)