

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UN CANAL DE FONDO FIJO LISO

P. A. Medeiros

Dr. Ingeniero Civil.

Prof. Assist. III, Univ. Estadual de Maringá, Paraná (Brasil).

E. Martínez Marín

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Prof. Titular de Hidráulica Fluvial,

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Madrid.

RESUMEN

Se han realizado ensayos de transporte sólido en un canal de fondo fijo liso con sedimentos de diámetros uniformes de 0,65; 1,02; 1,42; 2,10 y 2,84 mm, determinándose el inicio del depósito. Por medio del análisis dimensional se han determinado las ecuaciones de transporte para cada sedimento.

Asimismo, se propone una nueva ecuación general que unifica todos los resultados. Por último, se compara la ecuación final con las de otros autores.

ABSTRACT

Solid material transportation tests were performed in a smooth fixed bottom channel, with sediments of uniform diameters, of 65, 1.02, 1.42, 2.10 and 2.84 mm, ascertaining the start of the sedimentation. Through dimensional analysis, the transport equations for each sediment were established.

Likewise, a new general equation is proposed in order to unify all those results. The final equation is compared with those of other authors.

1. INTRODUCCIÓN

El problema del inicio de erosión y transporte de sedimentos en cauces abiertos de fondo móvil ha sido muy estudiado y existe abundante literatura sobre el tema. En cambio, los canales de fondo fijo no han merecido la misma atención. Es un trabajo de investigación básica y pretende aportar nuevos datos sobre el tema específico del arrastre de arenas en canales de fondo fijo liso y sección transversal rectangular.

Los resultados mejoran el conocimiento del fenómeno y sirven de ayuda a los proyectos de ingeniería hidráulica.

2. RESUMEN DE LA LITERATURA

Fondo móvil. De la vasta literatura existente se enumeran los autores más representativos:

Shields (17) en sus experimentos sobre inicio de erosión con distintos diámetros, ha introducido el concepto de tensión cortante crítica sobre el fondo. Propone una fórmula de transporte basada en el exceso de tensión cortante $\tau - \tau_c$ como elemento actuante sobre el movimiento de los granos.

Kalinske (12) no ha utilizado la diferencia citada sino que con el factor τ_c/τ y con la aplicación de probabilidades y la teoría del flujo turbulento llega a sus funciones de transporte sólido. Meyer Peter y Müller (14) han aportado una ecuación homogénea también utilizando el exceso de tensión cortante crítica $\tau - \tau_c$.

Consideran que parte de la energía del flujo es utilizada para transportar el material sólido. La energía sobrante es utilizada para transportar el líquido. Debido a la cantidad de datos y extenso rango de las variables, este trabajo es una referencia casi obligada.

Einstein (8) manejando elementos como: turbulencia, cambios de granos entre lecho y capa de transporte, proporcionalidad entre salto del grano y diámetro, equilibrio dinámico del fondo, etc. publicó su conocida función de arrastre.

Blench (4) y Yalin (19) son también referencia entre los muchos trabajos realizados en este campo.

Fondo fijo. Como se ha indicado, en ese campo la literatura es mucho más escasa y los resultados no son fácilmente comparables.

A partir de aquí serán definidos dos tipos de fondo fijo:

"liso"..... $k/d < 0,50$

"rugoso"..... $k/d \geq 0,50$

Siendo k la rugosidad absoluta del fondo y d el diámetro del sedimento. Esta clasificación ha sido realizada en el presente trabajo. No pretende ser definitiva y servirá sólo para facilitar la comparación entre trabajos de distintos autores. En el caso del vidrio o material similar, se considera la siguiente aproximación: $k = k/d = 0$.

Craven y Ambrose (7) han estudiado las condiciones de deposición en tuberías lisas de sección circular tanto bajo presión como a la superficie libre. Presentaron la relación:

$$\frac{Q}{g^{2/5} D^2 G_s^{1/5} (\beta - 1)^{2/5}} \leq 2,90 \quad (1)$$

siendo que para valores menores que 2,9 se garantiza el transporte sin deposición.

Pedroli (16) en su tesis doctoral ha utilizado un canal de hormigón liso de sección transversal rectangular, de 0,60 m de ancho por 44,0 m de largo y un canal de paredes de cristal y fondo de resina de poliéster, sección transversal rectangular de 0,30 m de ancho por 5,70 m de largo. Los sedimentos utilizados tenían diámetros aproximadamente uniformes de : 1,1; 2,6; 5,2; 8,5; 8,9 y 11,1 mm. El rango de caudales específicos (q) ha sido de 15 a 292 l/s/m. Las pendientes del fondo (I) oscilaban entre 0,1 y 1,0 %. Su expresión final es:

$$\frac{\tau^{8/5} g^{3/5} d^{1/5}}{\gamma_s^{8/5} \cdot v^{6/5}} = 1.6 + 0.069 \frac{g s}{\gamma_s \cdot v} \quad (2)$$

que ya está generalizada para todos los sedimentos usados. Se puede afirmar que ésta es una importante referencia dentro del tema.

Novak y Nalluri (15) estudiaron el inicio de erosión de partículas aisladas de arena, grava, plástico, antracita y plomo sobre fondo liso. Asimismo, analizaron el arrastre generalizado en una tubería de PVC de 152 mm de diámetro por 10,0 m de largo, una tubería de PERSPEX de 305 mm de diámetro por 8,0 m de largo y un canal de sección rectangular de vidrio, con 305 mm de ancho por 15,0 m de largo. Las fórmulas finales son:

Para canales de sección circular:

$$\frac{\tau^{5/4} g^{1/4}}{\gamma_s^{5/4} \cdot d^{1/2} v^{1/2}} = 0,017 + 0,69 \cdot 10^{-5} \left(\frac{G_s \cdot g^{1/3}}{\gamma_s \cdot v^{5/3}} \right) \quad (3)$$

Para canales de sección circular y rectangular, posibilitando el cálculo de la concentración de sedimentos:

$$\phi' = 10^4 \cdot (\psi)^{-2,3} \quad (4)$$

$$\phi = 11,6 \cdot (\psi)^{-2,04} \quad (5)$$

Ippen y Verma (11) han propuesto la función:

$$\frac{1,5 \cdot \tau_c}{\rho \cdot g \cdot (\beta - 1)^{1/2} \cdot k} = f\left(\frac{v^* \cdot d}{\gamma}\right) = f\left(\frac{11,6 \cdot d}{\delta'}\right) \quad (6)$$

basada en sus estudios sobre movimiento de partículas aisladas en fondo rugoso. Ese era constituido por arena de diámetro uniforme pegada sobre el fondo del canal.

Francis (9) ha aportado también interesantes detalles sobre el mismo tema del autor anterior.

Vickers, Francis y Grant (18) en un estudio patrocinado por la Asociación de Información e Investigación para la Industria de la Construcción (CIRIA) han determinado velocidades de transporte críticas para distintos tipos de partículas. Por ejemplo, llegaron a la conclusión de que para $V^* = 1,9$ cm/s no se transporta ninguna partícula.

Carty (5) trabajó con movimiento de esferas sobre una capa estacionaria de otras esferas iguales.

En el Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul (Brasil), se han realizado una serie de experimentos sobre arrastre de sedimentos en fondo fijo rugoso de sección transversal trapecial con 1,46 m de soleira y 27,0 m de largo. A continuación se incluye un resumen de las principales fórmulas de capacidad máxima de transporte encontradas:

$$a) \text{ Almeida (1) } \tau \cdot g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,471 + 0,071 g_s / \gamma_s v \quad (7)$$

válida p/ d=0,77 mm; $2,5 \leq q \leq 14$ l/s/m; $0,6 \leq l \leq 1,0$ %; k/d=1

b) Costa (6)

$$\tau \cdot g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,753 + 0,064 g_s / \gamma_s v \quad (8)$$

válida p/ d=1,22 mm; $2,5 \leq q \leq 14$ l/s/m; $0,6 \leq l \leq 1,0$ %; k/d=1

c) García (10)

$$\tau \cdot g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,9731 + 0,0588 g_s / \gamma_s v \quad (9)$$

siendo d=1,98 mm; $2,5 \leq q \leq 14$ l/s/m; $0,6 \leq l \leq 1,0$ %; k/d=1

d) Medeiros (13)

$$\tau \cdot g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,762 + 0,057 g_s / \gamma_s v \quad (10)$$

siendo d=0,77 mm; $3,0 \leq q \leq 11$ l/s/m; $0,6 \leq l \leq 1,0$ %
k=1,22 mm k/d=1,58

e) Medeiros (13)

$$\tau \cdot g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,926 + 0,083 g_s / \gamma_s v \quad (11)$$

válida para d=1,98 mm; $4,0 \leq q \leq 13$ l/s/m; $0,6 \leq l \leq 1,0$ %
k=1,22 mm k/d=0,62

f) Bordas (2), (3) utilizando datos de las cinco experiencias anteriores, sintetiza y consolida la teoría de base del fenómeno.

3. EXPERIMENTO Y METODOLOGÍA

La presente investigación se ha realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

El canal disponible (fig 1) tiene 0,30 m de ancho por 7,50 m de largo, con paredes de vidrio de 0,40 de alto y pendiente ajustable. Su fondo que es metálico, ha sido recrecido en 0,12 m con gravas y recubierto de una capa de mortero de arena (de diámetros inferiores a 0,65 mm) y cemento blanco. La rugosidad absoluta final (k) ha sido evaluada en 0,3 mm.

Considerándose los sedimentos utilizados y el valor de k, el fondo fijo utilizado es "liso" según

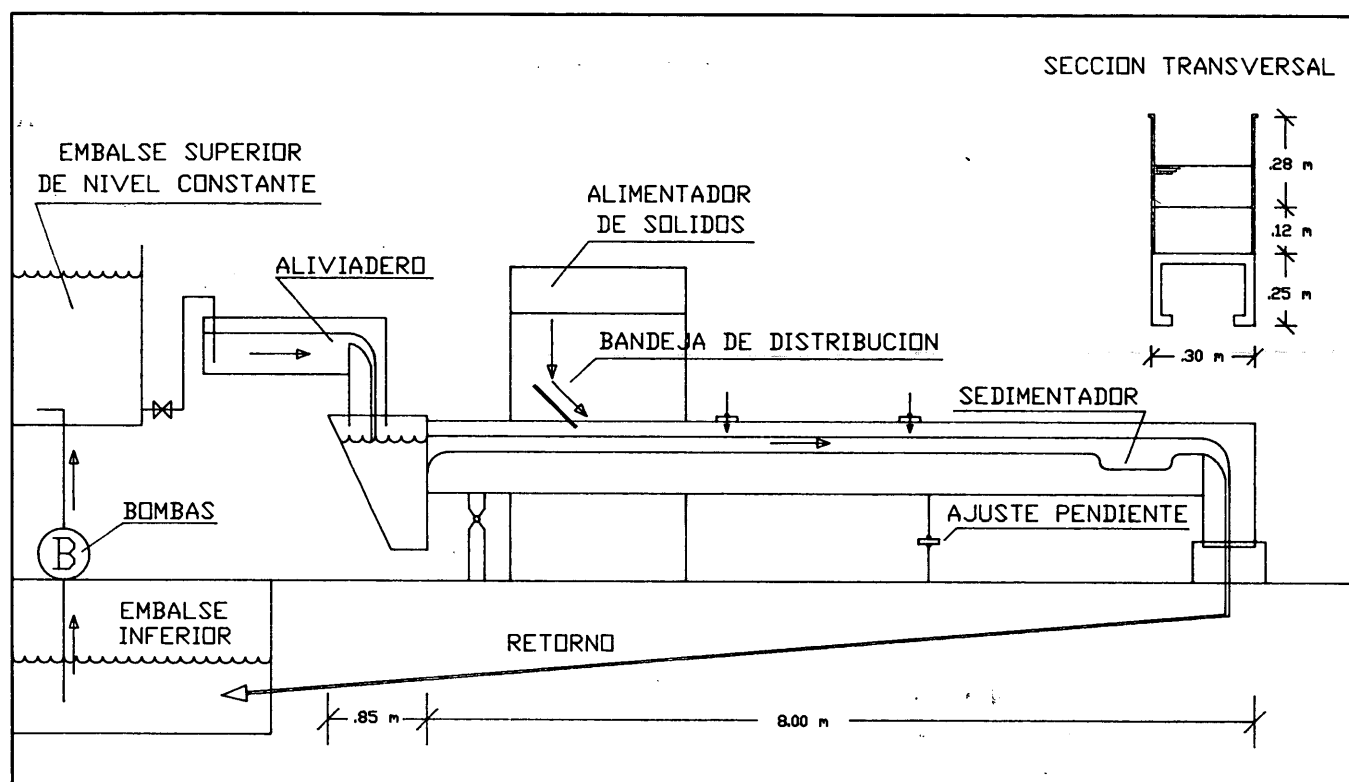


Figura 1.

clasificación ya descrita. Esa elevación del nivel del fondo ha hecho posible la construcción en la parte final del canal de una zona de sedimentación, que permite retirar con facilidad el sedimento allí retenido para su posterior secado y reutilización.

El caudal líquido es alimentado por un embalse de nivel constante y aforado por un aliviadero rectangular de pared delgada situado aguas arriba. El rango de caudales utilizables es de 1 a 45 L/s.

Un sistema de bombas centrífugas se encarga de mantener constante el nivel del embalse superior y recircular el agua en circuito cerrado.

En el centro del canal y a una cota superior, existe un equipo alimentador de caudales sólidos constante. Estos son inyectados en el flujo líquido durante los ensayos. El rango utilizable es de 0,339 a 8,503 kgf/min. Este sistema ha sido diseñado y construido especialmente para esta serie de ensayos.

Además de ser constante, el caudal sólido producido tiene una distribución absolutamente uniforme en los 0,30 m de ancho del canal.

Los sedimentos han sido obtenidos por tamizado de una muestra proveniente de la cuenca del río Manzanares, próximo a Madrid.

La Tabla 1 refleja sus principales características.

Tabla 1. Sedimentos utilizados

Sedimento	Identificación	d (mm)	γ_s (kgf/m ³)
Grava muy fina	A	2,84	2610
Grava muy fina	B	2,10	2610
Arena muy gruesa	C	1,42	2610
Arena muy gruesa	D	1,02	2610
Arena gruesa	E	0,65	2610

La metodología es la siguiente:

- Se elige un sedimento y se regula el dosificador para un caudal sólido constante deseado.
- Se posiciona el canal con la pendiente de fondo elegida.
- Se busca un caudal líquido suficiente para arrastrar con gran energía el caudal sólido con-

siderado y se establece el movimiento permanente uniforme en el canal.

d) Se inyecta el caudal sólido en el flujo permanente ya establecido, observándose su comportamiento y midiéndose todas las variables hidráulicas.

e) Se disminuye el caudal líquido y se opera como en el apartado d).

f) Se repite el ensayo varias veces siempre utilizándose caudales líquidos decrecientes.

g) Como la energía disponible para el transporte del caudal sólido constante es cada vez menor, en cada ensayo aumenta el número de granos que provisional o definitivamente se depositan de forma aislada. Así, se llega a un caudal líquido para el cual la tendencia a deposición es generalizada e irreversible.

El caudal de ensayo inmediatamente anterior es el considerado de "inicio de depósito", determinante de la máxima capacidad de transporte del flujo.

h) Se vuelve al ítem "a" y, según un programa de experiencias, se cambia progresiva y ordenadamente todas las variables consideradas.

Para cada uno de los 5 sedimentos, han sido testadas 3 pendientes de fondo y en cada pendiente 5 caudales sólidos dentro del rango factible del alimentador de sólidos. Es decir, el número total de experimentos fue de:

$$5 \times 3 \times 5 = 75$$

Según la metodología ya expuesta, en cada uno de los 75 experimentos se buscó el caudal líquido de "inicio de depósito" a través de varios ensayos, lo que ha resultado en este trabajo un total general de 525 ensayos.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Con vistas al desarrollo de ecuaciones capaces de reflejar el fenómeno ha sido utilizada la teoría del análisis dimensional, así como métodos estadísticos.

Las ecuaciones buscadas reflejan la capacidad máxima de transporte. En el caso presente, la modalidad de transporte ha sido el arrastre debido a que los diámetros de los sedimentos eran considerables y la turbulencia de la corriente insuficiente para mantenerlos en suspensión. Para pequeños caudales se ha observado que los granos se movían por rodadura y, para los caudales superio-

res, una combinación de rodadura y salto. El flujo del líquido en todos los ensayos ha sido turbulento con número de Reynolds entre 12490 y 204000. Asimismo, los números de Froude indican que los ensayos se situaron en el extremo inferior del régimen rápido.

El efecto del rozamiento en las paredes ha sido descontado, admitiéndose que la velocidad media es constante en toda la sección transversal y que el caudal total es la suma de un "caudal actuante sobre el fondo" y un "caudal actuante en las paredes". Es decir, este último no contribuye al arrastre debido a disipar su energía al vencer el rozamiento de las paredes. Ya que $R_e/f = R_{ew}/f_w$, se puede calcular f_w en la fórmula de Prandtl-V.Kármán para flujos turbulentos lisos. Admitiéndose que f , f_w y f_t son proporcionales a sus respectivos perímetros mojados y que $D = 4R$ se puede obtener el "caudal actuante sobre el fondo". Ese es lo que efectivamente transporta el sedimento y es utilizado en los cálculos. Con este, se calcula el radio hidráulico "de fondo", la tensión cortante sobre el lecho y el caudal específico q .

Dentro de los distintos números adimensionales posibles, se han utilizado:

a) Para cuantificar la energía que transporta el sedimento:

$$\left(\tau \cdot g^{1/3} \right) / \left(\gamma_s v^{2/3} \right) \quad (12)$$

b) Para cuantificar el caudal sólido transportado:

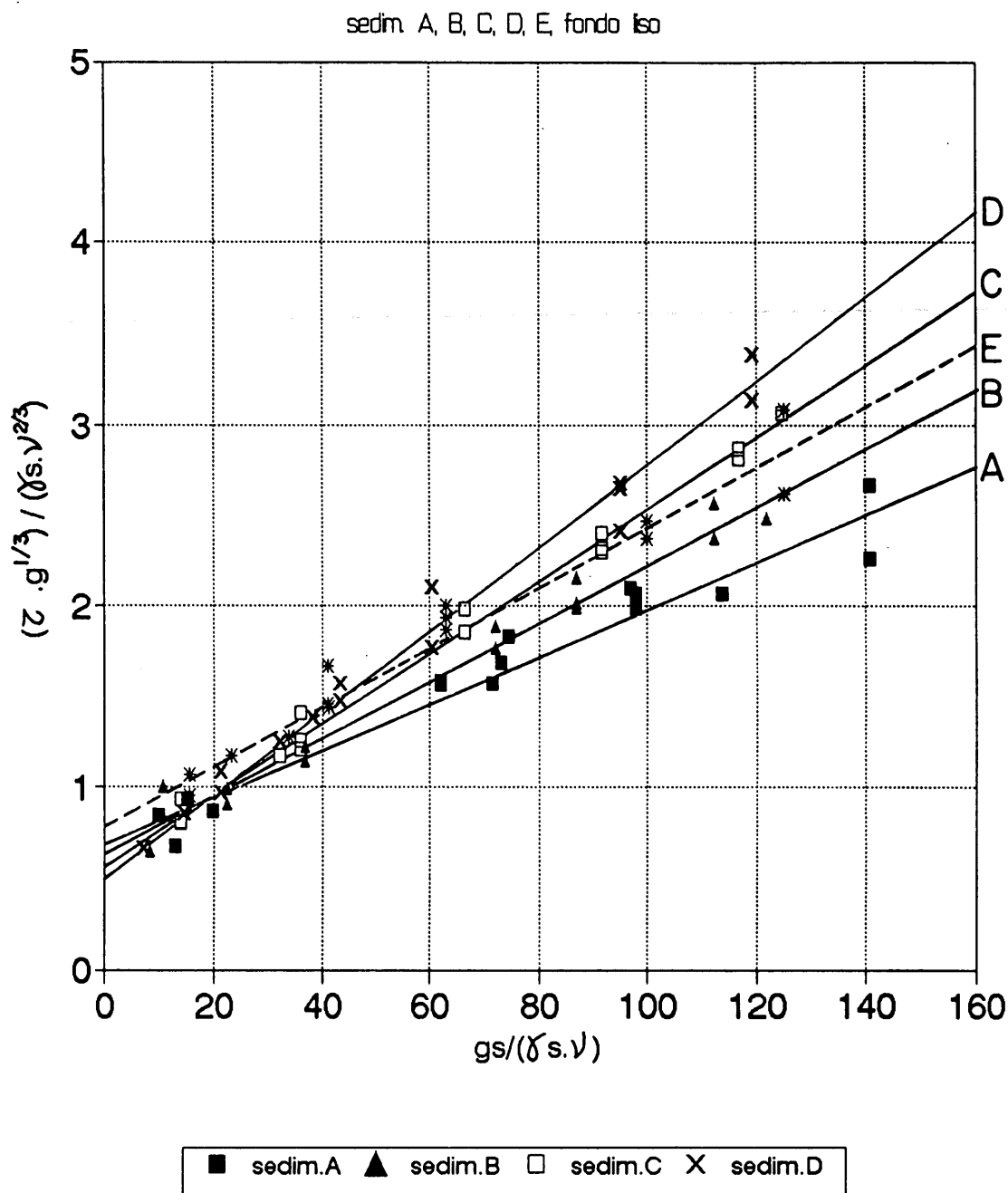
$$g_s / (\gamma_s v) \quad (13)$$

c) Para cuantificar la influencia del diámetro del sedimento:

$$\left(d \cdot g^{1/3} \right) / \left(\gamma^{2/3} \right) \quad (14)$$

La Figura 2 contiene el grupo de ensayos en los que se produce el inicio del depósito. (Situación límite de la capacidad de transporte). El análisis de esta figura demuestra que, en el rango de

Figura 2.



diámetros utilizados en los ensayos, los sedimentos de mayor diámetro son más fácilmente arrasados. Es decir, cuanto mayor es el diámetro, menor la energía necesaria para su transporte.

La interpretación es que los sedimentos mayores a pesar de su mayor peso, ofrecen más área de impacto a la corriente líquida facilitando su rodadura. También por presentar un menor factor

k/d pueden vencer más fácilmente el rozamiento con el fondo.

Un fenómeno distinto ocurre con el sedimento E ($d = 0,65$ mm) que parece ya pertenecer a otro rango de diámetros de distinto comportamiento. En este caso, su pequeño peso unido a la turbulencia, pasaría a ser el factor más importante facilitando el transporte. En los ensayos este sedi-

mento se ha comportado en la frontera entre arrastre y suspensión. Considerándose que ese último sedimento no se comporta como los demás, no ha sido incluido en la unificación de las ecuaciones (ecuación 21) porque correspondería a otro tipo de transporte. En todo caso, su estudio ha sido necesario para poder delimitar el rango de validez de los ensayos realizados.

La ecuaciones individuales encontradas para cada sedimento están reflejadas en la Tabla 2.

Para la unificación de las ecuaciones es necesario incluir el grupo adimensional correspondiente al diámetro del sedimento.

Se admitió que esa función unificada pudiera tener la siguiente forma:

$$\frac{g_s}{\gamma_s v} = f \left[\left(\frac{\tau g^{1/3}}{\gamma_s v^{2/3}} \right) \left(\frac{d g^{1/3}}{v^{2/3}} \right)^A \right] \quad (20)$$

La fórmula final encontrada es la ecuación 21 totalmente adimensional con un coeficiente de correlación igual a 98,4 %.

$$\frac{\tau g^{0,417} d^{0,250}}{\gamma_s v^{0,833}} = 1,518 + 0,043 \frac{g_s}{\gamma_s v} \quad (21)$$

Tabla 2. Ecuaciones para cada tipo de sedimento

Sedim.	Ecuación	r %
A	$\tau g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,689 + 0,013 g_s / \gamma_s v$	97,7 (15)
B	$\tau g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,618 + 0,016 g_s / \gamma_s v$	98,8 (16)
C	$\tau g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,579 + 0,019 g_s / \gamma_s v$	99,6 (17)
D	$\tau g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,541 + 0,022 g_s / \gamma_s v$	99,1 (18)
E	$\tau g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3} = 0,808 + 0,016 g_s / \gamma_s v$	98,2 (19)

La Figura 3 contiene esta función y los puntos correspondientes a los datos obtenidos en los distintos ensayos.

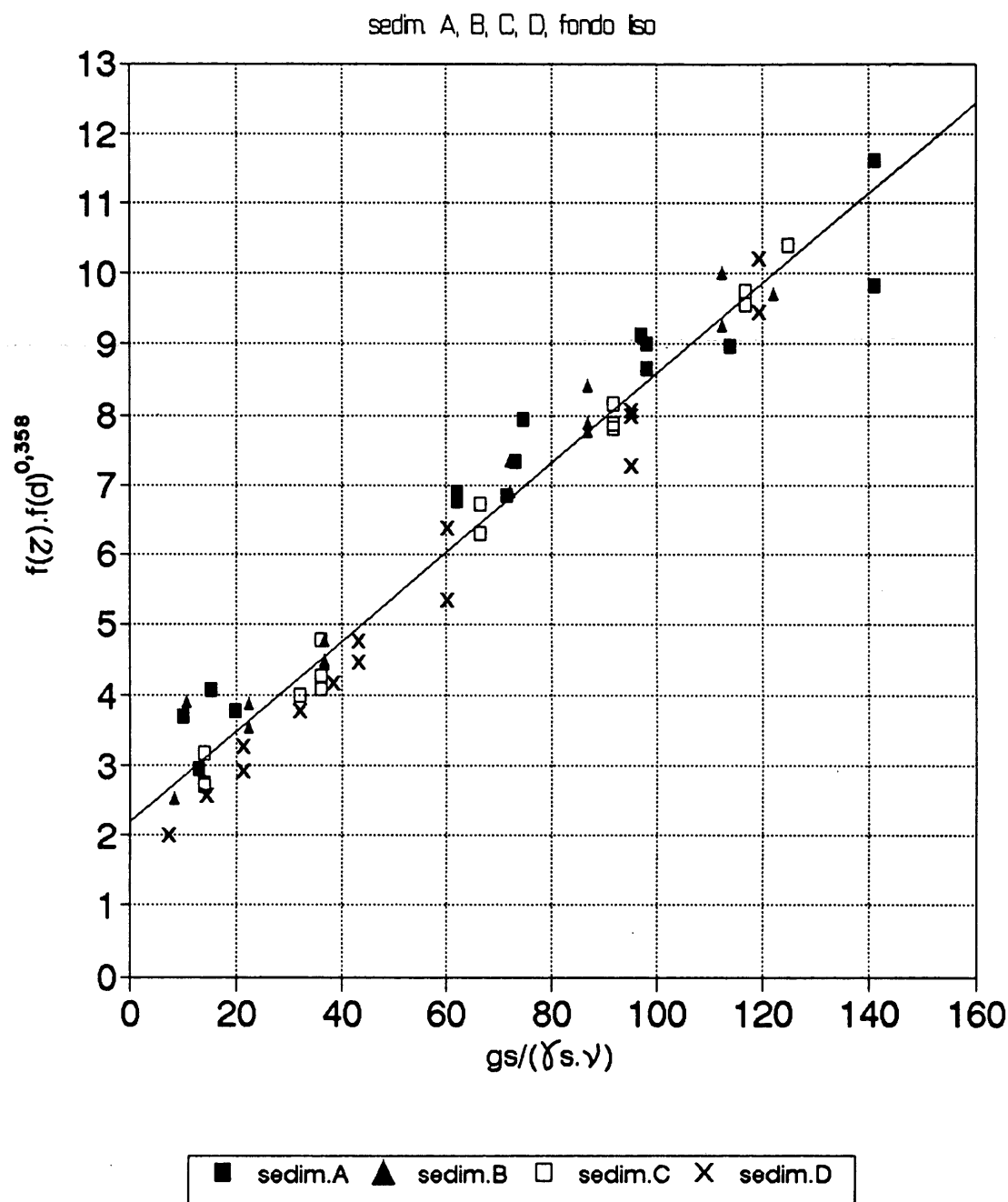
5. COMPARACIÓN CON OTROS TRABAJOS

Aunque no sea el objetivo principal del presente trabajo, se ha incluido, de forma muy resumida, una comparación de la presente investigación con otros trabajos. Para ello, la tarea exige similitud en

Tabla 3 . Comparación con otras ecuaciones

AUTOR	ECUACIÓN	SECCIÓN TRANSV.	FONDO
Este trabajo	$g_s = 6,03 \tau d^{0,25} - 0,092$	Rect.	Fijo
Pedroli	$g_s = 7,59 \tau^{1,60} d^{0,20} - 0,075$	Rect.	Fijo
N.y Nalluri	$G_s = 1,7 \cdot 10^{-4} \tau^{1,25} d^{-0,50} - 3 \cdot 10^{-5}$	Circ.	Fijo
Almeida	$g_s = 0,30 \tau - 0,017$	Trapec.	Fijo
Costa	$g_s = 0,33 \tau - 0,031$	Trapec.	Fijo
García	$g_s = 0,36 \tau - 0,044$	Trapec.	Fijo
Medeiros (I)	$g_s = 0,37 \tau - 0,035$	Trapec.	Fijo
Medeiros (II)	$g_s = 0,26 \tau - 0,029$	Trapec.	Fijo
M.P. Müller	$g_s = (1,16 \tau - 93,1 d)^{1,50}$	Rect.	Móvil

Figura 3.



los aparatos experimentales y el la metodología. En los pocos trabajos comparables disponible, se ha sustituido γ_s , v y g por sus valores constantes para facilitar la comparación.

El experimento de Pedrolí (16), juntamente con la línea de investigación del Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul (Brasil), son trabajos muy similares al presente. Los resultados de Novak y Nalluri (15),

son válidos para canales de sección circular pero como la metodología fue similar han sido incluidos en la comparación.

Aunque la fórmula de Meyer-Peter y Müller (14) sea para canales aluviales, pareció interesante su presencia por ser una confrontación con fondo móvil y sobretodo por tratarse de una referencia casi obligada. En este último caso se consideró el radio hidráulico referente al caudal actuante sobre

el fondo y que no tuviera formas del lecho ($K_s/K_r = 1$).

La tabla 3 contiene un resumen de estas comparaciones.

De una manera general, dentro del límite de las variables utilizadas, se nota que las fórmulas son parecidas lo que confirma y consolida el conocimiento del fenómeno físico.

Para fondo fijo se observa:

a) Los parámetros de las ecuaciones indican de manera muy clara la gran influencia de la rugosidad absoluta de fondo en el transporte sólido por arrastre. Es decir, para un determinado valor de τ constante, el fondo "liso" tiene capacidad de transporte aproximadamente de 3 a 8 veces superior al fondo "rugoso".

b) El caudal sólido transportado es directamente proporcional al diámetro del sedimento en los casos de fondo "liso" con sección transversal rectangular.

c) Para fondos "rugosos" con $k/d = 1$ de sección transversal trapezoidal y, fondos "lisos" de sección transversal circular, ocurre lo contrario.

d) El fondo "rugoso" con $k/d = 1,22/1,98$ ofrece más dificultad al arrastre que su similar con $k/d = 1,98/1,98$ lo que a primera vista puede parecer una contradicción ya que en el segundo caso la rugosidad absoluta del fondo es mayor. Uno de los autores (13), ha considerado que en los fondos "rugosos" con $0,50 \leq k/d \leq 1,00$, el fenómeno es más complejo y propone una interpretación deta-

llada en la referida publicación. Asimismo, señala la falta de trabajos en ese detalle en concreto.

Para el fondo móvil, la fórmula de Meyer-Peter y Müller (14) señala dos diferencias con relación al fondo fijo:

a) Bajo las mismas condiciones, el caudal sólido en fondo móvil es aproximadamente 2 a 4 veces inferior al de fondo fijo debido a las formas de lecho.

b) El caudal sólido es inversamente proporcional al diámetro del sedimento como en el caso c) del fondo fijo.

Como se puede apreciar el fenómeno del transporte de sedimentos es función de un gran número de variables y aunque se obtenga una adecuada ecuación, esta varía según el rango de caudales líquidos.

6. CONCLUSIONES

Las ecuaciones obtenidas aportan nueva información en ese campo de escasa literatura, contribuyendo así al mejor conocimiento del transporte de sedimentos en cauce fijo. Aunque este trabajo está en el ámbito de la investigación básica, sus resultados ya pueden servir de base al análisis del transporte sólido en canales revestidos. Por último, dado el rango de caudales ensayados, queda todavía por analizar el contraste de estas fórmulas para valores del caudal líquido más elevados. ●

Lista de símbolos

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES	SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
d	diámetro medio del sedimento	m	q	caudal líquido, por unidad de ancho	m ³ /s/m
D	diámetro de un conducto	m	γ_s	peso específico del grano seco	Kgf/m ³
f	coeficiente de fricción para toda sección	-	t_s	tiempo de arrastre medio de un grano	s
f_w	coeficiente de fricción para la pared	-	T	temperatura del líquido	°C
f_f	coeficiente de rozamiento en el fondo	-	τ	tensión cortante en el lecho	kgf/m ²
g	aceleración de la gravedad	m/s ²	τ_c	tensión cortante crítica en el lecho	kgf/m ²
G_s	caudal sólido total, en peso	kgf/s	β	densidad del sedimento	-
g_s	caudal sólido en peso, por unidad de ancho	kgf/s/m	ν	viscosidad cinemática del fluido	m ² /s
h	calado antes de la inyección de sedimentos	m	ρ	masa específica del grano	kg/m ³
h_s	calado durante el transporte sólido	m	R	radio hidráulico para toda la sección	m
l_0	pendiente del fondo	-	R_e	nº de Reynolds para toda la sección	-
J_e	pendiente de energía	-	R_{ew}	nº de Reynolds para el caudal "de pared"	-
k	rugosidad absoluta del fondo	m	R_{ef}	nº de Reynolds para el caudal "de fondo"	-
k/d	rugosidad relativa entre fondo y sedimento	-	v^*	velocidad de corte $v^* = (\tau / \rho)^{0.5}$	m/s
K_s	coef. de rugosidad de Strickler general	m ^{1/3} /s	r	coeficiente de correlación	-
K_r	idem, debido a los granos reg. distrib.	m ^{1/3} /s	ψ	parámetro del flujo	-
Q	caudal líquido total	m ³ /s	θ	parámetro de transporte	-
			θ'	parámetro de transporte	-

NOTAS

- 1) **Almeida, L.E.S.B. de**(1980). Contribuicao a previsao da capacidade de transporte por arraste em canal a fundo fixo e liso. Porto Alegre, Universidad Federal do Río Grande do Sul, Curso de Pos Graduacao em Recursos Hidricos e Saneamento. 170f. Dissertacao de Mestrado em Engenharia Civil.
- 2) **Bordas, M.P y Medeiros, P.A.**(1987). Influencia da rugosidade de fundo de um canal fixo sobre a formacao de depositos de areia.VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos,II Simposio Luso-Brasileiro de Hidraulica e Recursos Hidricos. Salvador, Brasil.
- 3) **Bordas, M.P.; Borges, A.L. de O.; Medeiros, P.A.** (1988) Puissance Hydraulique et dépôt de sediments en eaux courantes. Sediment Budgets. I AHS Publication nº174. Porto Alegre, Brasil.
- 4) **Blench, T.**(1957). Regime behavior of canal and rivers. Butterworth Scientific Publications, London, England.
- 5) **Carty, J.T.** (1957). Resistance Coefficients for Spheres on a PlaneBoundary. Thesis presented to the M.I.T. at Cambridge, Mass. in 1957, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science.
- 6) **Costa, A.R. da** (1974). Contribuicao à previsao de deposito de sedimentos em canal de fundo fixo. Porto Alegre, U.F.R.G. do Sul, Curso de Pos-Graduacao em Hidrologia Aplicada.103 p. Dissertacao de Mestrado em Hidrologia Aplicada.
- 7) **Craven, J.P., and Ambrose. H.H.,** (1953) The transportations of sand in pipes.Proceedings of the Fifth Hydraulic Conference, Bulletin 34, State Universite of Iowa Studies in Engineering, Iowa State University. Ames, Iowa.
- 8) **Einstein,H.A.**(1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin nº 1026.
- 9) **Francis, J.R.D.** (1973). Experiments on the Motion of Solitary Grains along the Bed of a Water Stream. Proceedings of the Royal Society, Vol. A 332, London, England.
- 10) **Garcia. E.P.** (1983). Contribuicao a previsao da capacidade de transporte em canais de fundo fixo e móvel. Pôrto Alegre, Universidad Federal do Río Grande do Sul, Curso de Pós Graduacao em Recursos Hidricos e Saneamento. 191 f. Diss. de Mestrado em Engenharia Civil.
- 11) **Ippen, A.T. and Verma, R.P.** (1953) The Motion of Discrete Particles along the Bed of a Turbulent Stream. Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, Minn.
- 12) **Kalinske, A.A.** (1942) Criteria for Determining Sand-transport by Surface Creep and saltation. Transactions American Geophysical Union.
- 13) **Medeiros, P.A.** (1986). Efeito da rugosidade de fundo sobre a formacao dos depósitos em canal de fundo fixo rugoso. Dissertacao de Mestrado. CPGRHS./IPH/Universidad Federal do Río Grande do Sul. 136 p. Pôrto Alegre, Brasil.
- 14) **Meyer, Peter y Muller** (1948). Formulas for Bed-load Transport. International Association of Hydraulics Research, 2 d Meeting, Stockholm.
- 15) **Novak P. y Nalluri C.**(1975) Sediment Transport in Smooth Fixed Bed Channels. Journal of the Hydraulics Division,New York, ASCE, 101(9): 1139-54.
- 16) **Pedroli, R.** (1963) Transporto di materiale solido in canali a fondo fisso e liscio. Tesi Dottore in Scienze Tecniche. Scuola Politecnica Federale, Zurigo, Svizzera.
- 17) **Shields, A.** (1936) Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforzchung auf die Geschiebebewegung.Mitteilungen der preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau. H. 26, Berlin.
- 18) **Vickers, J.A., Francis, J.R.D. and Grant, A.W.** (1968) Erosion of sewer and Drains.Construction Industry Research and Information Association. Research Report 14.
- 19) **Yalin, M.S.** (1972). Mechanics of Sediment Transport.2 ed. Oxford Pergamon Press.