

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XI CONGRESO CHILENO

**ANALISIS DE SALTACION DE GRAVAS POR
MEDIO DE IMAGENES DE VIDEO**

Yarko Niño'
Marcelo García'
Luis Ayala'

RESUMEN

Se presenta antecedentes experimentales y análisis de variables que caracterizan el movimiento de saltación de partículas sólidas del tamaño de gravas constitutivas de un lecho móvil. La investigación está basada en el uso de técnicas de video-grabación y captura de imágenes apoyadas en un software especial, todo lo cual permite estudiar estadísticamente trayectorias y velocidades de saltación de partículas sólidas así como el proceso de colisión que se verifica con el lecho. La información presentada provee de nuevos datos acerca del fenómeno de saltación que extienden y complementan evidencia experimental existente.

1 Ayudante 1°, Depto de Ing Civil, Universidad de Chile.
2 Assistant Professor, Dept of Civil Engrng, University of Illinois at Urbana, Champaign.
3 Profesor Titular, Depto de Ing Civil, Universidad de Chile.

Introducción

El transporte de sedimento por el fondo resulta en general de la combinación de tres tipos de movimiento elemental de las partículas sólidas que forman parte de un lecho granular móvil: rodante, resbalante y saltante. De acuerdo con Bagnold (1973), la saltación es el movimiento que realizan las partículas en la forma de saltos o brincos consecutivos debido principalmente al impulso que generan los sucesivos choques con otras partículas del lecho. La saltación se diferencia del transporte en suspensión en que en este último prima la turbulencia como mecanismo de sustentación de los sólidos en el seno del fluido.

En el presente trabajo se da a conocer algunos resultados experimentales concernientes con las características del proceso de saltación de partículas naturales del tamaño de gravas, moviéndose por efecto de un flujo macro-rugoso como arrastre de fondo en un canal de laboratorio de alta pendiente. Estos experimentos fueron grabados en video utilizando un filmadora convencional y luego digitalizados en un computador para su posterior análisis. Se presenta y analiza las propiedades geométricas y cinemáticas de las trayectorias de saltación así como ciertos parámetros característicos que describen los choques entre partículas en movimiento y partículas del lecho.

Antecedentes sobre la Saltación

Uno de los estudios experimentales recientes más relevantes en relación al tema de la saltación es el realizado por Francis (1973) que fuera posteriormente extendido por Abbott y Francis (1977). En estas investigaciones se caracterizó diferentes aspectos del proceso de saltación de partículas aisladas, moviéndose sobre un lecho constituido por partículas de características similares a las primeras. Se hizo uso de técnicas fotográficas especiales para analizar ensayos sobre el movimiento elemental de partículas los cuales incluyeron material natural y materiales más livianos sometidos a condiciones hidráulicas diversas, cubriendo un rango dado de esfuerzos de corte y razones altura-diámetro de las partículas.

Con anterioridad Gordon et al. (1972) habían investigado el fenómeno, proveyendo de una descripción de la saltación de esferas de plástico en un canal de experimentación angosto, que si bien es más que todo cualitativa, resulta atinente al presente estudio, particularmente en lo que se refiere al proceso de colisión de las partículas con su lecho. La investigación de

Fernández-Luque y van Beek (1976) también aporta antecedentes experimentales valiosos sobre la saltación, basados en la filmación de secuencias de partículas en movimiento saltante lo cual permitió realizar estimaciones de las velocidades medias de dichas partículas en la dirección del flujo. El uso de técnicas de procesamiento de imágenes de video fue incorporado a la investigación del movimiento de partículas sólidas como arrastre de fondo por Drake et al (1988), aunque su trabajo no llegó a incluir una caracterización cuantitativa del proceso de saltación.

Las relaciones adimensionales que describen las variables de interés en el proceso de saltación (Fig.1) son de acuerdo con García y Niño (1992):

$$\underline{x} = \underline{f}(\tau_*, Re_p, s) \quad (1)$$

donde \underline{x} representa un vector, cuyas componentes son variables adimensionales de saltación tales como altura (h_s^+), longitud (λ_s^+), velocidad media en la dirección del escurrimiento (u_s^+), diferencia de velocidad en el choque (Δu_s^+), etc, adimensionalizados con el diámetro D de la partícula las dos primeras y con la velocidad de fricción u_* las segundas de estas variables:

$$h_s^+ = h_s/D; \quad \lambda_s^+ = \lambda_s/D; \quad u_s^+ = u_s/u_*; \quad \Delta u_s^+ = \Delta u_s/u_* \quad (2)$$

Los parámetros adimensionales de la ec (1), son el esfuerzo de corte adimensional (τ_*), el N° de Reynolds de la partícula (Re_p) y la densidad de los sólidos sumergida relativa (s), definidos como:

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{gRD}; \quad Re_p = \frac{\sqrt{sgD^3}}{\nu}; \quad s = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (3)$$

La ec (1) podría incluir además parámetros tales como la altura de escurrimiento relativa h/D y el N° de Froude si se trata de escurrimientos macro-rugosos y flujos de alta velocidad.

Estudio Experimental

La investigación experimental fue llevada a cabo en el Laboratorio del Centro de Recursos-Hidráulicos de la Universidad de Chile, según se describe en detalle en Ayala y Valenzuela (1993). Se utilizó un canal de 15 m de longitud y 0.49 m de ancho cuya pendiente puede ser variada entre 0 y 7.3%, y una de cuyas paredes es vidriada para facilitar las observaciones. Se realizaron ensayos con dos tipos de grava natural redondeada de $s = 1.65$,

de tamaño uniforme con D_{50} igual a 1.5 cm y 3.1 cm, respectivamente. Las experiencias se desarrollaron bajo condiciones de flujo uniforme y arrastre de fondo en estudio de equilibrio. En la Tabla 1 se indican las principales variables asociadas a cada ensayo ejecutado.

La información sobre las trayectorias de saltación y velocidades de desplazamiento de las partículas fue obtenida a partir de filmaciones en video utilizando una cámara convencional de 30 cuadros por segundo, localizada en el tramo central del canal. Para definir con mayor claridad las imágenes se usó un colimador que permitió iluminar una franja central del flujo de unos 10 cm de espesor. De esta forma fue posible grabar las trayectorias de las partículas que se desplazaban a lo largo del canal siguiendo aproximadamente su eje.

El análisis de las imágenes fue realizado en el Laboratorio de Hidrosistemas de la Universidad de Illinois, seleccionando cuadros específicos para ser digitalizados en un PC por medio de un "Capturador de Imágenes", conectado a un grabador de video cassettes. Mediante el empleo de un software especializado se obtuvo las coordenadas de los centros de gravedad de las partículas en que aparecían grabadas en cada cuadro. A partir del seguimiento de las partículas individualizadas en sucesivos cuadros, se determinó las trayectorias, velocidades longitudinales y otras variables de interés para caracterizar el movimiento de dichas partículas.

Tabla 1 Condiciones Experimentales

D (mm)	S_o	τ^*	u^* (m/s)	h/D	Rep	Fr
15	0.03	0.09	0.14	4.7	7387	1.29
15	0.05	0.12	0.17	4.1	7387	1.03
15	0.07	0.14	0.18	3.3	7387	1.10
31	0.03	0.08	0.20	4.8	21948	1.53
31	0.05	0.09	0.22	3.2	21948	1.29
31	0.07	0.10	0.23	2.6	21948	1.48

Debido a las distintas condiciones experimentales empleadas en los ensayos, hubo que utilizar dos criterios distintos de muestreo. Para las partículas menores, cuyas tasas de arrastre eran mayores, se utilizó un tiempo de muestreo de 1 seg (pasaban entre 5 y 45 partículas por la ventana de control), un intervalo de muestreo de 5 seg y un período total de muestreo de aproximadamente 60 seg. Para las partículas de mayor tamaño, asociadas a tasas de arrastre

más bajas, se eligió un muestreo continuo con un período total de muestreo comprendido entre 120 y 180 seg. Con ambos métodos se analizaron alrededor de 80 eventos de saltación individual.

Resultados Experimentales

a) Trayectorias de Saltación.

A partir de las trayectorias de eventos individuales de saltación fue posible determinar las propiedades geométricas y cinemáticas del proceso de saltación, en términos de las medias y desviaciones estándares de alturas, longitudes y velocidades longitudinales de partículas saltantes. Conocida la duración de la saltación t_s , la velocidad media longitudinal está dada por $u_s = \lambda_s/t_s$. Los valores medios integrados se calculan a partir de todas las observaciones realizadas, adimensionalizándolos como sigue:

$$h_s^* = \langle h_s \rangle / D; \quad \lambda_s^* = \langle \lambda_s \rangle / D; \quad u_s^* = \langle u_s \rangle / D \quad (4)$$

donde el paréntesis angular representa en cada caso la media integrada de la variable.

En las Figs 2 y 3 se han graficado estas variables adimensionales en función de la razón τ_c/r_c , donde τ_c es el esfuerzo de corte adimensional obtenido de la curva de Shields. En estas figuras el trazo vertical representa la magnitud de la desviación estándar. En la Fig 2 se ha indicado también los resultados de Abbott y Francis (1977) en tanto en la Fig.3 se incluye los datos de Fernández-Luque y van Beek (1976) y de Ashida y Michiue (1972).

Los resultados de la Fig 2 señalan a h_s variando en el rango de 1 a 2, mientras que λ_s lo hace entre 5 y 10, con una tendencia creciente de ambas variables a crecer con la razón τ_c/r_c .

La comparación entre datos de longitud de saltación de la presente investigación con la curva de Abbott y Francis (1977), muestra que el Re_p parece no incidir significativamente en esta variable, aunque en el caso de la altura de saltación dicho parámetro adimensional aparece jugando claramente un rol. La diferencia entre los datos experimentales y la curva revela por otro lado, que dicha curva tiende a subestimar la altura si se toma en cuenta sólo los puntos cuyo rango de Re_p es más parecido al que corresponde a la curva. Ello podría deberse a que estos investigadores realizaron su estudio con un lecho fijo y en consecuencia,

menos rugoso que el de la presente investigación, resultando en menores probabilidades de que los rebotes de las partículas saltantes se realizarán con mayores ángulos con respecto al lecho, y por lo tanto, también con menores alturas de saltación.

Otro aspecto que cabe comentar es el relativo a la influencia que tiene h/D sobre las trayectorias de saltación: al menos en el rango estudiado esta influencia aparece poco significativa si se tiene presente que las experiencias realizadas por Abbott y Francis incluyeron valores desde 5.8 hasta 8.6, es decir, algo superiores a los del presente estudio que muestra la Tabla 1. No obstante ello, podría esperarse que esta influencia alcance cierta relevancia cuando la altura de escurrimiento sea muy pequeña (p.e: alturas similares al tamaño del sedimento), por cuanto las trayectorias quedan truncadas por arriba lo que en efectivamente se observó ocurría en algunos de los ensayos analizados.

En cuanto a la velocidad media de traslación de las partículas, la Fig 3 muestra que los datos experimentales adimensionales están comprendidos entre valores de 3 a 4, e incluidos dentro de la banda definida superiormente por los datos de Fernández-Luque y van Beek (1976) e inferiormente por la curva teórica propuesta por Ashida y Michiue (1972). Además la tendencia creciente de los datos experimentales con τ/τ_c es semejante al de ambas curvas.

Bridge y Dominic (1984) propusieron la siguiente expresión para describir la velocidad adimensional media:

$$u_s^+ = \{ 2.5 \text{Ln} [(\frac{h_n}{h_s}) (\frac{D}{k_s}) (2.53 \sqrt{\tau_s - \tau_{s,c}} + 0.5)] + 8.5 \} (1 - \sqrt{\frac{\tau_{s,c}}{\tau_s}}) \quad (5)$$

donde h_n representa la altura efectiva del empuje del fluido (Bagnold, 1973) y k_s la altura de las asperezas del lecho, siendo las razones h_n/h_s y D/k_s similares a la unidad. Sin embargo, Abbott y Francis (1977) encontraron con sus datos experimentales, que la primera de estas razones está comprendida en el rango de 0,6 a 1,4.

La forma de la ec. (5) es semejante a la propuesta por Fernández-Luque y van Beek, Ashida y Michiue, y Engelund y Fredsoe (1976). Hay que mencionar sin embargo, la dificultad que presenta su uso en la práctica por lo incierto y difícil que resulta determinar el esfuerzo de corte asociado al umbral de movimiento de las partículas (τ_s).

Al calibrar la ecuación anterior con los datos experimentales del presente estudio, se obtuvo $\tau_{*c} = 0.036$ que es un valor más bajo que el de la curva de Shields, confirmando antecedentes como los de Ayala y Campos (1990) quienes reportaron también valores de τ_{*c} bastante bajos cuando los flujos son macro-rugosos, llegando incluso hasta el límite inferior 0.02. En esta calibración se usó $h_r/h_s = 0.84$ y $D/k_s = 1.0$; aunque se encontró que la calibración en términos de τ_{*c} no es muy sensible a estos dos parámetros.

En la Fig 4 aparecen comparados los datos experimentales de la velocidad adimensional con las curvas teóricas, pudiéndose apreciar la buena concordancia que se logra con las curvas de Ashida y Michiue, y Bridge y Dominic al emplear $\tau_{*c} = 0.036$.

Los datos presentados permiten además sacar algunas conclusiones respecto del tipo de fuerzas que determinan la trayectoria de saltación de las partículas. Según Leeder (1979) el número de Froude de las partículas, definido como $\phi = u_*^2 / g\lambda_s$, toma el valor 1 cuando se cumple la premisa de Bagnold que señala que el peso sumergido de los sólidos saltantes es soportado sólo por los esfuerzos apuntando hacia arriba, resultantes de las fuerzas de reacción normales del choque con el lecho. Sin embargo, con los datos del presente estudio se obtienen valores de ϕ del orden de 0.20 lo que coincide con lo discutido por Leeder al analizar los datos de Abbott y Francis que también tenían asociados valores de este parámetro bastante menores que la unidad. Esta reducción de ϕ estaría vinculada a la existencia de fuerzas distintas de las provenientes de las colisiones entre partículas, tales como las de sustentación hidrodinámica y fuerzas debido al efecto Magnus causado por la rotación de las mismas.

b) Choque de las Partículas con el Lecho.

A partir de los eventos de choques de partículas con el lecho registrado en imágenes de video, resulta posible analizar aspectos específicos que caracterizan este tipo de eventos, tales como diferencias de velocidad y ángulos de despegue de las partículas al momento de colisión. También es posible determinar coeficientes de fricción dinámico μ_d conociendo las diferencias de velocidad, puesto que se cumple (Abbott y Francis, 1977; García y Niño, 1992):

$$\mu_d = (s + 1) \tau_* \Delta u_*^+ / u_{*c} \lambda_s \quad (6)$$

donde Δu_x^+ representa el valor medio de la diferencia entre las velocidades antes y después de la colisión, adimensionalizado con u . En la Fig 5 se ha graficado los resultados de este coeficiente en función de la razón de esfuerzos de corte adimensionales τ_c/τ_w , distinguiendo los ensayos por medio del número de Reynolds Re_p , en tanto en la Fig 6 se ha incluido la información referente a los ángulos de despegue en función del ángulo incidente de cada partícula; se ha diferenciado aquí los puntos según los números de Reynolds y los esfuerzos de corte del lecho.

Respecto de lo mostrado en la Fig 5, se puede comentar que el valor prácticamente constante de $\mu_a \approx 0.30$ es muy inferior al valor 0.80 predicho numéricamente por Sekine y Kikkawa (1992), aunque bastante similar al consignado por Bagnold (1956) para esferas lisas (0.32). En la figura también aparecen los valores de Francis (1973) y Abbott y Francis (1977), los cuales se ubican alrededor de un media igual a 0.40. Aunque Bagnold plantea que este coeficiente debiera ser cercano a $\tan \alpha = 0.63$ (α es el ángulo de fricción interna que para el material de las experiencias es cercano a 32°), y Abbott y Francis sugieren que la diferencia con sus datos pueda deberse a la imposibilidad de medir con exactitud las velocidades justo antes y después del choque, los datos del presente estudio permiten suponer que no es del todo descartable la posibilidad que dicho coeficiente sea efectivamente más cercano al de esferas lisas.

En relación a los ángulos de despegue θ incidentes a nivel del lecho, lo que aparece mostrado en la Fig 6 demuestra que se trata realmente de un proceso aleatorio, aunque se aprecia también que los ángulos incidentes se agrupan en el rango de 5 a 30° , en tanto los de salida lo hacen entre 0 y 60° . En todo caso, a nivel de valores medios se aprecia en la Fig 7 una tendencia decreciente con el esfuerzo de corte τ_c que resulta más o menos independiente de Re_p , siendo sistemáticamente los ángulos incidentes menores que los de despegue en alrededor de 15° .

Modelación del Proceso de Choques

No existe en la actualidad consenso acerca de si la colisión de las partículas del lecho va acompañado siempre de un rebote (así lo sugieren Wiberg y Smith, 1985) o de si la saltación se reestablece después de un movimiento rodante transitorio (Gordon et al., 1972; Abbott y Francis, 1977), aunque es evidente que en ninguno de los dos casos se pueda

conservar el momento en el choque puesto que las fuerzas externas (fluido) que actúan sobre las partículas son de una magnitud no despreciable comparada con las fuerzas impulsivas provocadas por el choque. En todo caso, en relación al modo de colisión dominante, los antecedentes analizados en el presente estudio demuestran que tienden a producirse ambos tipos de choque (con rebote o con rodamiento posterior): cuando una partícula choca directamente contra otra del lecho el modo más frecuente es "choque-rebote" en cambio cuando la partícula cae en una zona intersticial, se produce frecuentemente un choque y luego un movimiento rodante.

Con el objeto de modelar el modo de colisión del tipo "choque-rebote", se hizo uso del método propuesto por García y Niño (1992) para el cual se supone que la partícula incidente con un ángulo θ_n golpea a una del lecho en un punto en que la tangente forma un ángulo θ_b , tal como se muestra en la Fig 8. Las componentes tangencial (u_T) y normal (u_N) de la velocidad de impacto de la partícula con respecto a la superficie de choque, se supone experimentan una reducción después del choque, cumpliéndose:

$$u_T^{(o)} = f u_T^{(i)}, \quad u_N^{(o)} = -e u_N^{(i)} \quad (7)$$

donde los supraíndices (o) e (i) demotan respectivamente la situación posterior y anterior al choque, y f y e los coeficientes de reducción (< 1). El rebote se realiza con un ángulo θ_r y componentes de velocidades $v_T^{(o)}$ y $v_N^{(o)}$ que pueden ser relacionadas con los componentes de la velocidad inmediatamente antes del choque $v_T^{(i)}$ y $v_N^{(i)}$, teniéndose:

$$\operatorname{tg} \theta_r = \frac{e}{f} \operatorname{tg} (\theta_i + \theta_b) \quad (8)$$

$$v_T^{(o)} = f [(v_T^{(i)})^2 + (v_N^{(i)})^2]^{1/2} \cos (\theta_i + \theta_b) \frac{\cos (\theta_r + \theta_b)}{\cos \theta_r} \quad (9)$$

$$v_N^{(o)} = f [(v_T^{(i)})^2 + (v_N^{(i)})^2]^{1/2} \cos (\theta_i + \theta_b) \frac{\operatorname{sen} (\theta_r + \theta_b)}{\cos \theta_r} \quad (10)$$

Con la información experimental grabada en video resulta posible determinar los coeficientes e y f , pero no así el ángulo θ_r . Por tal motivo, se hace uso del modelo de García y Niño (1992) suponiendo que el lecho está constituido por esferas uniformes dispuestas en forma compacta a partir de lo cual puede derivarse una función densidad de probabilidad condicionada $p(\theta_r/\theta_i)$ basada en una función densidad de probabilidad uniforme de las

distancias r mostradas en la Fig 8. Los resultados obtenidos aparecen graficados en el Fig 9, tanto bajo la forma de función de densidad de probabilidad condicionada, como de valores esperados, máximos y mínimos de θ_b en función de θ_i .

Mediante el uso de valores medios θ_i y θ_a de la Fig.7 y las medias integradas de las componentes de la velocidad de las partículas justo antes y después de los choques con el lecho, se obtuvo los valores de e y f a partir de las ecs. (8) y (9), considerando el valor medio de θ , como sigue:

$$\theta_r - \langle \theta_o \rangle = E [\theta_b / \langle \theta_i \rangle] \quad (11)$$

donde nuevamente los paréntesis angulares representan medias integradas y E es el valor esperado calculado de la función de densidad de probabilidad $p(\theta_b/\theta_i)$. Los resultados obtenidos aparecen graficados en la Fig.10 en función de r , para los distintos valores de Re_p que corresponden a las experiencias.

Se puede constatar que f , que es el coeficiente asociado a la componente tangencial, resulta aproximadamente constante e igual a 0.73, en tanto "e" decrece linealmente con r , anulándose alrededor de $r = 0.15$. De acuerdo con lo reportado por Gordon et al. (1972), la componente tangencial se mantiene mientras que la componente en la dirección de la línea que une los centros de las partículas que chocan, se anula, lo cual implica que "f" debiera tener un valor cercano a la unidad y "e" ser cero, esto último por cuanto dichos autores nunca observaron un rebote hacia atrás. Los resultados del presente estudio demuestran en cambio que $f = 0.73$ y que "e" se anula sólo para valores de $r > 0.15$.

El hecho que se afirme que $e = 0$ por parte de ciertos investigadores, puede ser cuestionado puesto que para que se produzca un rebote hacia atrás $\theta_i + \theta_b \geq 90^\circ$, lo que representa eventos de muy baja probabilidad de ocurrencia. Ello unido a que efectivamente "e" presenta valores bastante bajos, hace posible que en la práctica nunca se observe un rebote en reversa. Por otro lado, los resultados de la Fig 10 también son concordantes con la idea planteada por Wiberg y Smith (1985) en el sentido que resulta posible que el lecho se deforme progresivamente a medida que r vaya creciendo, lo que justificaría el uso de un coeficiente de restitución decreciente y por lo tanto, también de un "e" decreciente en el modelo.

Conclusiones

Las técnicas de video grabación y análisis han permitido investigar con cierto grado de detalle el proceso de saltación de partículas de grava, demostrando su potencialidad en este tipo de estudio.

La información analizada ha servido para caracterizar la altura de saltación h_s , la longitud de saltación λ_s y la velocidad media de traslación u_s en función de las propiedades de fluido representadas por la razón τ/τ_c , Re_p y h/D . Se ha encontrado que estas variables crecen con la razón de esfuerzos de corte pero no dependen de la altura relativa. El número de Reynolds de la partícula tampoco juega un papel significativo, aunque alguna influencia parece tener sobre la altura de saltación.

También se ha estudiado el comportamiento del coeficiente de fricción dinámica encontrándose que su valor es similar al encontrado por otros investigadores aunque difiere del de propuesto por Bagnold.

El análisis del proceso de choques basado en un modelo choque-rebote, muestra que los factores de reducción de las velocidades normales y tangenciales no coinciden exactamente con lo planteado por otros autores, aunque existen antecedentes que permiten explicar dichas discrepancias. Lo más relevante es que la reducción en la componente normal es constante y del orden de un 27% (factor = 0.73) en tanto el factor de reducción en el componente normal tiende a anularse a medida que se iguala o excede $\tau_c = 0.15$.

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos a las Universidades de Chile a Illinois que participan en el financiamiento del proyecto y al FONDECYT que aportó recursos económicos a través de los proyectos N°397/89 y 1225/91.

Referencias Bibliograficas

Abbott, J.E., and Francis, J.R.D. (1977). "Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream". Philos. Trans., Royal Soc. of London. A, 284, pp 225-254.

Ashida, K. and Michiue, M. (1972). "Study on hydraulic resistance and bedload transport rate

in alluvial streams". Proc. Japan Soc. Civ. Engrg., 206, pp 59-69.

Ayala, L. y Valenzuela, R. (1993). "Movimiento Elemental de Sedimento Uniforme Grueso y su Relación con el Transporte Generalizado Macro-Rugoso", Centro de Recursos Hidráulicos, Depto. de Ing. Civil, U. de Chile, Pub. CRH 93-77-1.

Ayala, L. y Campos, J. (1990). "Hacia una formulación unificada de la condición hidráulica de transporte incipiente para flujos macro-rugosos", XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Montevideo, Uruguay.

Ayala, L., López, A. and Valenzuela, R. (1992). "Movimiento elemental de partículas y el transporte de sedimento". XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.

Bagnold, R.A. (1973). "The nature of saltation and of "bed-load" transport in water". Proc. R. Soc. of London. A, 332, pp 473-504.

Bagnold, R.A. (1956). "The flow of cohesionless grains in fluids". Philos. Trans., Royal Soc. of London. A, 249, pp 235-297.

Bridge, J.S., and Dominic, D.F. (1984). "Bed load grain velocities and sediment transport rates". Water Resour. Res., 20 (4), pp 476-490.

Drake, T.G., Shreve, R.L., Dietrich, W.E., Whiting, P.J., and Leopold, L.B. (1988). "Bedload transport of fine gravel observed by motion-picture photography". J.Fluid Mech. Vol. 192, pp 193-217.

Engelund, F., and Fredsoe, J. (1976). "A sediment transport model for straight alluvial channels". Nordic Hydrol., 7, pp 293-306.

Fernández-Luque, R., and Van Beek, R. (1976). "Erosion and transport of bed sediment". J. Hydr. Res., 14 (2), 127-144.

Francis, J.R.D (1973). "Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water stream". Proc. R. Soc. of London. A, 332, pp 443-471.

García, M. and Niño, Y. (1992). "Lagrangian description of bedload transport by saltating particles". Proc. VIIAHR Int. Symp. on Stochastic Hydraulics, Taipei, Taiwan, pp 259-266.

Gordon, R., Carmichael, J.B., and Isackson, F.J (1992). "Saltation of plastic balls in a 'one-dimensional' flume". Water Resources Res., 8 (2), pp 444-459.

Leeder, M.R. (1979). "Bedload dynamics: Grain impacts, momentum transfer and derivation of a grain Froude number". Earth Surface Processes, Vol 4, pp 291-295.

Sekine, M., and Kikkawa, H. (1992). "Mechanics of saltating grains. II". J. Hydr. Engrg., ASCE, 118 (4), pp 536-558.

Wiberg, P.L., and Smith, J.D. (1985). "A theoretical model for saltating grains in water". J.Geophysical Res., 90 (C4), pp 7341-7354.

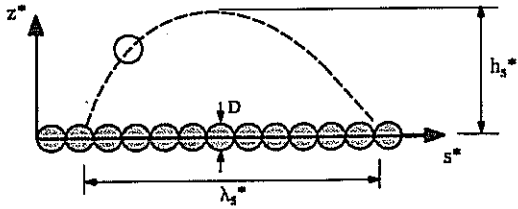


Fig.1 Esquema de Definición de Variables de Saltación

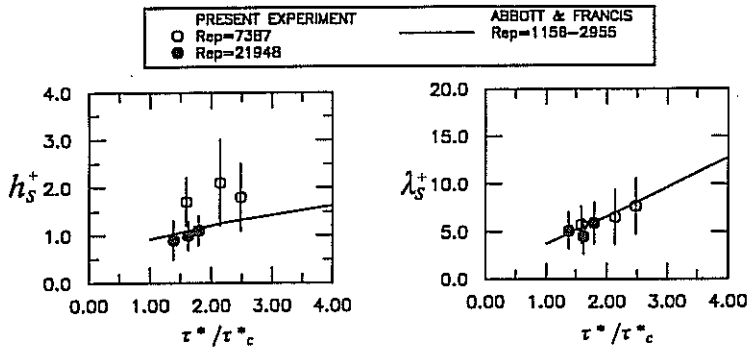


Fig.2 Altura y Longitud Adimensional de Saltación

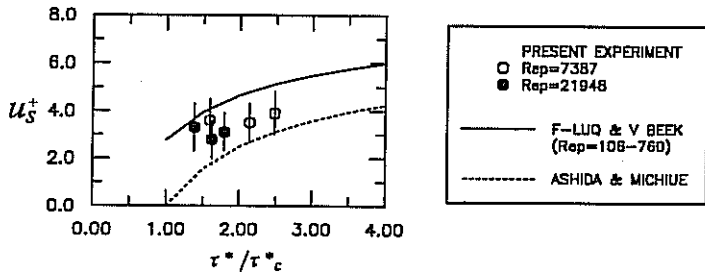


Fig.3 Velocidad de Traslación Adimensional de Saltación

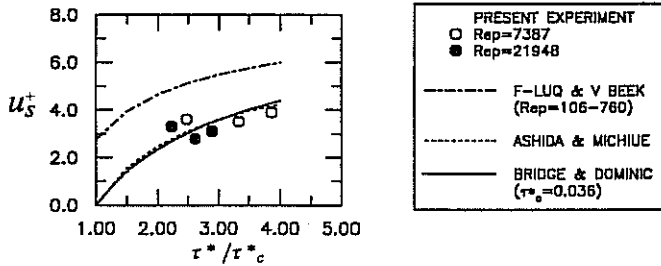


Fig.4 Calibración del Esfuerzo de Corte Crítico

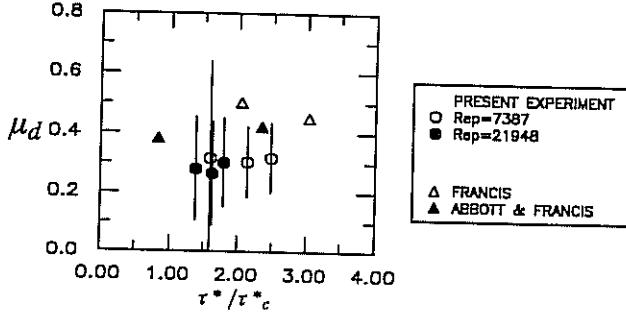


Fig.5 Coeficiente de Fricción Dinámica

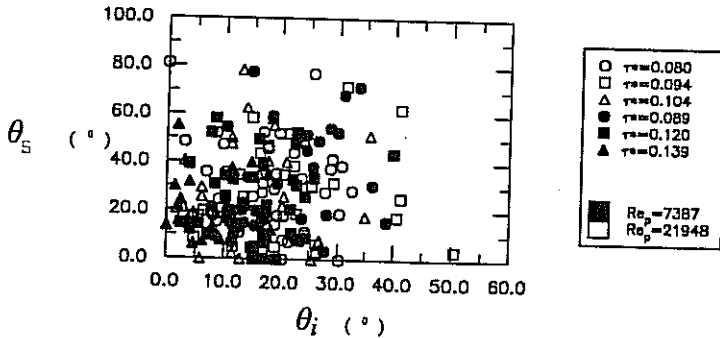


Fig.6 Ángulos Incidentes y de Despegue en el Choque

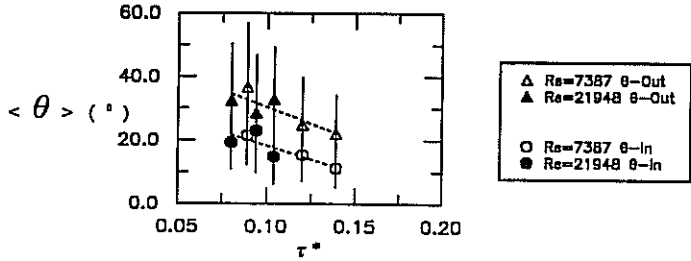


Fig. 7 Valores Medios y Desviación Estándar de Angulos de Choque

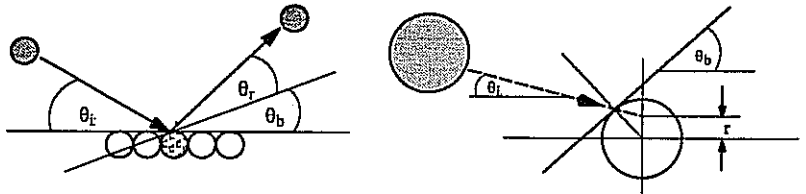


Fig.8 Esquema de Definición de Variables Características del Choque

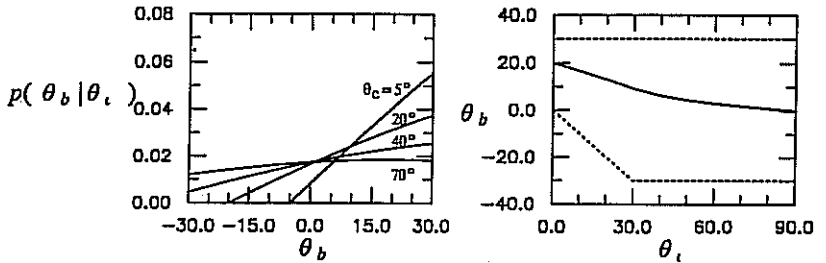


Fig.9 Función Densidad de Probabilidad Condicionada y Angulos de Choque

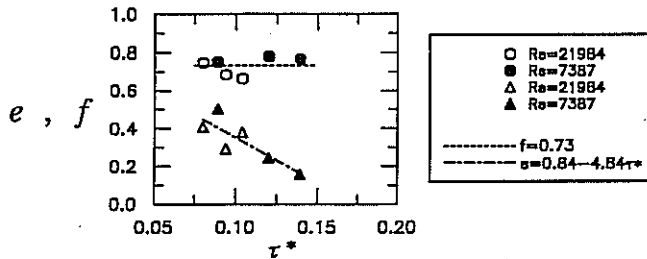


Fig.10 Coeficientes de las Componentes Normal y Tangencial de Velocidad de Colisión

