

# Erosión cerca de estructuras hidráulicas - predicción y leyes de similitud en modelos hidráulicos con sedimentos finos

Bernd Ettmer

Universidad Polytécnica Magdeburg, Alemania

César Adolfo Alvarado-Ancieta

Consultor de obras hidráulicas e ingeniería de ríos en Alemania y Perú

Paula Ramírez-Bernini

Universidad Técnica de Braunschweig, Alemania

*El conocimiento del proceso de erosión y máxima profundidad de socavación cerca de estructuras hidráulicas es de importancia fundamental para la aplicación de criterios de diseño para aliviaderos, puentes, pilares, etcétera. En la literatura conocida no existe una aproximación estándar para la estimación de la máxima profundidad de erosión. En contraste, el cálculo de una fosa de erosión incluye enormes variaciones para el cálculo de la máxima profundidad y tiempo de erosión, especialmente para sedimentos finos. Este artículo trata sobre problemas prácticos para la predicción de la erosión local en la descarga o alrededor de estructuras hidráulicas. Se presentan resultados de estudios experimentales sobre erosión o socavación utilizando sedimentos finos, así como también sedimentos sintéticos como material conformante del lecho del cauce. El análisis de los datos indica la existencia de leyes de similitud para la interacción hidráulica-sedimentológica.*

**Palabras clave:** erosión, socavación, sedimentos finos, leyes de similitud, estructuras hidráulicas.

## Introducción

El conocimiento del proceso de erosión y máxima profundidad de socavación en la descarga o alrededor de estructuras hidráulicas es de fundamental importancia para la aplicación de criterios de diseño para aliviaderos, puentes, pilares, etcétera. En el mundo se conocen numerosos daños y destrucciones en las estructuras hidráulicas a causa de estos motivos. Un ejemplo son los puentes sobre el río Piura en Perú, durante el evento máximo del fenómeno El Niño de 1998 (Alvarado-Ancieta y Ettmer, 2008) (ver ilustración 1) o la destrucción de la presa Los Ejidos en 1983, en Perú (ver ilustración 2).

En la literatura actual existen diferentes ecuaciones para la estimación de la máxima profundidad de la erosión en distintas construcciones. A pesar de esto, un cálculo con estas ecuaciones muestra enormes variaciones, especialmente cuando se tiene la presencia de sedimentos finos. Por ejemplo, en el cuadro 1 se observan los resultados de un cálculo típico para la socavación de un aliviadero con compuertas verticales. Los valores varían sumamente en el cálculo de sedimentos finos (ver cuadro 1, columna 2). Lo contrario ocurre con sedimentos rocosos, los cuales no presentan grandes desviaciones absolutas entre sí mismos (ver cuadro 1, columna 3).

Debido a esto, la predicción de la máxima profundidad de socavación es compleja, especialmente en sedimentos finos. Es por esto que el ingeniero encargado de las construcciones hidráulicas debe evaluar la debida

**Ilustración 1. Colapso del Puente Viejo (1998), río Piura, Perú.**



**Ilustración 2. Falla de la presa Los Ejidos (1983), río Piura, Perú.**



proporción y correcto dimensionamiento de la fundación o protección que debe proporcionarse para analizar y enfrentar el problema de erosión.

A consecuencia de estos resultados, el ingeniero civil necesita alguna otra solución para la predicción de socavaciones en la descarga o alrededor de las estructuras hidráulicas.

Para entender mejor esta situación se llevan a cabo modelos físicos en institutos hidráulicos que ayudan a entender el fenómeno. No obstante, un modelo físico representa también un obstáculo para transmitir la escala natural de los sedimentos finos.

Por ejemplo, la transferencia de la arena fina  $d_{50}=0.4$  mm (sedimento natural) a una escala típica para un modelo físico (cerca de 1:40 a 1:100) sería de un diámetro de 0.01 a 0.004 mm (arcilla gruesa y fina). A consecuencia de este cambio, el material presenta una característica cohesiva y un movimiento completamente distinto de la realidad.

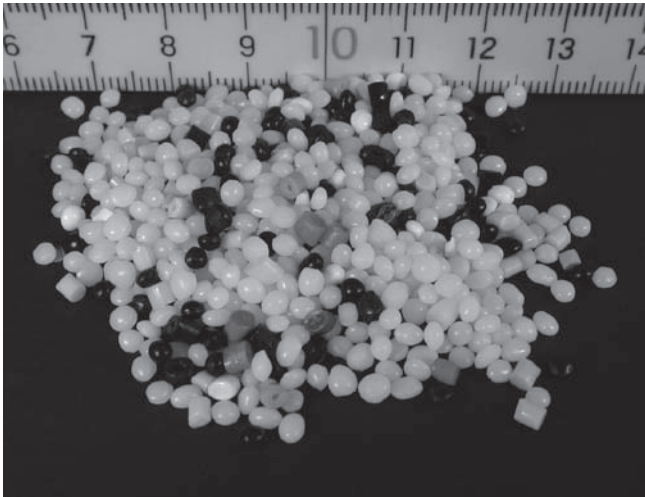
La única solución se encuentra en el uso de partículas elaboradas de material sintético y con una densidad ligera. En general, las densidades de estos materiales sintéticos se encuentran entre 1 050 y 1 600 kg/m<sup>3</sup>, y los diámetros característicos varían desde 0.1 hasta 4 mm, tal como se aprecia en la ilustración 3.

Por estas diferencias en los parámetros básicos no existe una transmisión teórica para los sedimentos finos. Por ello se requiere de mucha experiencia y una gran calidad de experimentos para la selección de un material sedimentológico adecuado para el modelo físico, dejando así ciertas inseguridades en las predicciones de la socavación del modelo físico, entre otros (Yalin 1959; Günzel, 1964; Breusers, 1966; Dietz, 1969, 1976 y 1994; Kobus, 1978; Zanke, 1982; Dorer, 1984; Mertens, 1987 y 2002).

**Cuadro 1. Prognosis de socavación para una presa-aliviadero con compuertas verticales (Ettmer, 2004).**

| Estimaciones (varios)      | Máx. socavación (m)<br>sedimentos finos (arena)<br>( $d_{50}=0.1$ mm, $d_{90}=0.4$ mm) | Máx. socavación (m)<br>sedimentos rocosos (piedra)<br>( $d_{50}=10$ mm, $d_{90}=15$ mm) |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Eggenberger (1943)         | 30.5                                                                                   | 3.3                                                                                     |
| Müller (1944)              | 69.9                                                                                   | 6.9                                                                                     |
| Shalash (1959)             | 42.2                                                                                   | 6.1                                                                                     |
| Qayoum (1960)              | 18.7                                                                                   | 7.5                                                                                     |
| Straube (1963)             | 6.3 hasta 15.8                                                                         | Resultado negativo                                                                      |
| Altinbilek/Basmaci (1973)  | 78.2                                                                                   | 7.8                                                                                     |
| Rajaratnam (1981)          | 121                                                                                    | 8.7                                                                                     |
| Breusers y Raudkivi (1991) | 295                                                                                    | 11.8                                                                                    |
| Hoffmans (1997)            | 6.3                                                                                    | 1.9                                                                                     |

**Ilustración 3. Diferentes materiales sintéticos para la simulación de sedimentos finos en modelos físicos.**



## Objetivos

El objetivo de la presente investigación es ensayar una nueva aproximación para la profundidad máxima de erosión, debajo de compuertas verticales en modelos físicos con materiales sintéticos y obtener una solución para la transmisión de sedimentos finos con características similares en la naturaleza y en un modelo con parámetros adecuados. Siendo así más fácil la predicción de socavación en estos modelos con materiales sintéticos.

Por eso, en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Leichtweiss de Obras Hidráulicas, en la Universidad Técnica de Braunschweig, se llevaron a cabo diversos experimentos. A continuación se presenta una parte de los resultados fundamentales para las socavaciones aguas abajo de la presa con compuertas verticales.

## Teoría y parámetros típicos

*Fundamentos de Yalin (1965) para una corriente uniforme*

Una corriente uniforme con sedimentos tiene una definición con siete parámetros característicos: profundidad del agua ( $d$ ), pendiente longitudinal del cauce ( $S$ ), viscosidad cinemática ( $\nu$ ), densidad del agua ( $\rho$ ), diámetro del grano ( $D_{ch}$ ), densidad del sedimento ( $\rho_s$ ) y aceleración de la gravedad ( $g$ ), entre otros (Yalin, 1971; van Rijn, 1984).

Estos siete parámetros básicos se pueden reducir a tan sólo cuatro sin dimensión: el índice para movilidad o índice de Shields (1936)  $Fr^* = (u^*/\Delta g D_{ch})$ , con la velocidad de tensión de corte  $u^* = (\tau_0/\rho)^{0.5} = (gdS)^{0.5}$ , el

índice de Reynolds  $Re^* = (u^* D/\nu)$ ; el parámetro de la densidad específica  $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ , y la relación entre la profundidad del agua y el diámetro característico del sedimento  $\varepsilon = (d/D)$ .

Sin embargo, durante la socavación local no existe una corriente uniforme, sino una irregular e inestable. Por eso la velocidad de tensión de corte  $u^*$  no es aplicable como un parámetro hidráulico, porque  $u^*$  tiene una definición para la profundidad del agua ( $d$ ) y para la pendiente longitudinal del cauce ( $S$ ). En un hoyo de socavación, estos dos parámetros no tienen una definición.

A menudo la velocidad de tensión de corte  $u^*$  es reemplazada por la velocidad  $u$ , que representa la velocidad mediana entre la puerta abierta (*i.e.* Dietz, 1969; Zanke, 1978; Rajaratnam, 1981). En lugar del parámetro de movilidad de  $Fr^*$ , el índice de densidad  $Fr_d$  es estable. La importancia física de  $Fr_d$  se muestra en la ecuación (1). El índice de la densidad de Froude representa la relación de dos fuerzas: la fuerza de propulsión en relación con el peso sumergido:

$$Fr_d = \frac{u}{\sqrt{\Delta g D_{ch}}} = \frac{\rho u^2}{(\rho_s - \rho) g D_{ch}} = \frac{\rho u^2 D_{ch}^2}{(\rho_s - \rho) g D_{ch}^3} \quad (1)$$

$$Fr_d \sim \frac{\text{fuerza de propulsión}}{\text{peso sumergido del grano}}$$

El índice de densidad de Froude  $Fr_d$  es el parámetro de transporte más importante para condiciones irregulares para corrientes (entre otros, ver los trabajos de Rajaratnam, 1981; Hassan y Narayanan, 1985; Johnston, 1990). Con esto es posible describir cualquier proceso físico irregular en la zona de aspereza con la ecuación (2):

$$\Pi_A = \lambda_1 (Fr_g) \quad (2)$$

Para la descripción del proceso hidráulico sedimentológico con el material sintético se requiere una consideración de la viscosidad cinemática del líquido. La mayoría de estos procesos sucede en la zona de transición. De esta manera, el índice de Reynolds tiene una mayor influencia; además, la velocidad de tensión de corte  $u^*$  es reemplazada por la velocidad  $u$  en la ecuación (3):

$$Re_g = \frac{u D_{ch}}{\nu} = \frac{u D_{ch}}{\frac{\mu}{\rho w}} = \frac{\rho u^2 D_{ch}^2}{u D_{ch} \mu} \quad (3)$$

$$Re_g \sim \frac{\text{fuerza de propulsión}}{\text{fuerza de la viscosidad}}$$

El denominador de  $Re_g$  es llamado fuerza cinemática (ver Schlichting, 1965; Oertel Jr., 2002). Una extensión de la ecuación (2) se presenta en la ecuación (4):

$$\Pi_A = \lambda_2(F_{rd}, Re_g) \quad (4)$$

Parámetro para partícula  $D^*$  y definición de parámetro de resistencia  $X_g$

La introducción del parámetro para la partícula ya se hizo, por ejemplo, en van Rijn (1984). El parámetro para la partícula  $D^*$  se define como la relación entre  $Re^{*2}/Fr^*$ , como se muestra en la ecuación (5):

$$D^* = \frac{Re^{*2}}{Fr^*} = \frac{\frac{u^{*2}D_{ch}^2}{v^2}}{\frac{u^{*2}}{\Delta g D_{ch}}} = \frac{\Delta g D_{ch}^3}{v^2} = \left(\frac{\Delta g}{v^2}\right)^{1/3} D_{ch} \quad (5)$$

Nota: el parámetro  $u^*$  es cambiado por la velocidad  $u$ , de manera que ahora  $D^*$  se define como  $Re_g^2/Fr_g^2$ .

Como se ve en la ecuación (5),  $D^*$  sólo contiene parámetros de materiales: la densidad del sedimento ( $\rho_s$ ), el diámetro del grano ( $D_{ch}$ ), la densidad del agua ( $\rho$ ) y la viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ), así como la aceleración de la gravedad ( $g$ ). Por esto,  $D^*$  se llama también parámetro de materiales.

Con una transformación adicional a la ecuación (4) se puede establecer un nuevo parámetro sin dimensión. Este parámetro es llamado parámetro de resistencia  $X_g$  y se define en la ecuación (6):

$$\Pi_A = \lambda_3\left(\frac{Fr_d^2}{Re_g^2}, \frac{Re_g}{Fr_d^2}\right) = \lambda_3(D^*, X_g) \quad (6)$$

El objetivo en definir este parámetro sin dimensión es que permite describir la interacción de la hidráulica-sedimentológica en la zona de transición.

Como se observa en la ecuación (7),  $X_g$  incluye el diámetro del grano ( $D_{ch}$ ) y la densidad del sedimento ( $\rho_s$ ), la viscosidad cinemática ( $\nu$ ), la densidad del agua ( $\rho$ ), la aceleración de la gravedad ( $g$ ) y la velocidad media ( $u$ ):

$$X_g = \frac{Re_g}{Fr_d^2} = \frac{\frac{\nu D_{ch}}{v}}{\frac{v^2}{\Delta g D_{ch}}} = \frac{\Delta g D_{ch}^2}{\nu v} \quad (7)$$

La relevancia física de  $X_g$  se muestra en la ecuación (8):

$$X_g = \frac{\Delta g D_{ch}^2}{\nu v} = \frac{\Delta g D_{ch}^3}{u D_{ch} \frac{\mu}{\rho}} = \frac{(\rho_F - \rho) g D_{ch}^3}{u D_{ch} \mu} \quad (8)$$

$$X_g \sim \frac{\text{peso sumergido del grano}}{\text{fuerza de la viscosidad}}$$

Parámetros para construcciones hidráulicas

El proceso de socavación abajo de una compuerta vertical es afectado por los siguientes parámetros de construcción (ver ilustración 4):

$l$  (m) largo del fondo (m).  
 $s$  (m) altura del fondo (m).  
 $a$  (m) apertura de la compuerta vertical (m).

Como ha sido probado en diferentes investigaciones, el parámetro de construcción principal es la apertura de la compuerta vertical  $a$  (ver Rajaratnam, 1981). La influencia de la altura del fondo y el largo del fondo tienen menor importancia, particularmente por las condiciones  $l < 1.5\Delta d$  y  $s < 0.3\Delta d$  (ver Shalash, 1959; Dietz, 1973).

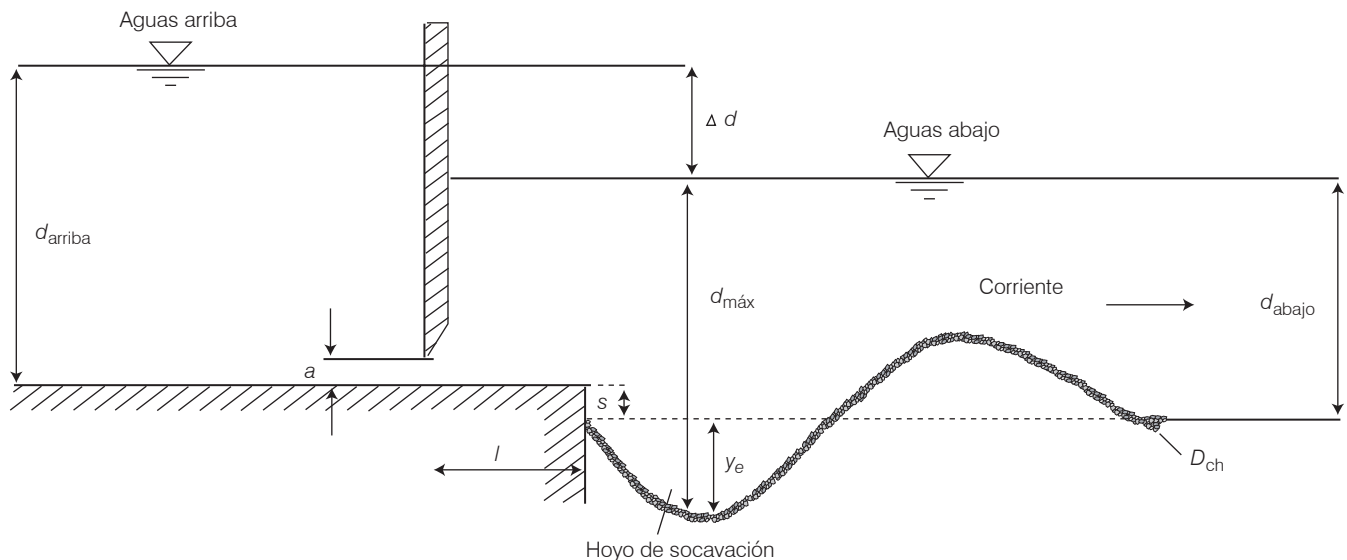
Adicionalmente, existen diferentes tipos de corriente que se pueden desarrollar abajo de la compuerta vertical, como se muestra en la ilustración 5.

Muchas investigaciones fueron efectuadas para especificar estas corrientes, por ejemplo Shalash (1959), Rajaratnam y MacDougall (1983), Mohamed y McCorquodale (1992) y Abdel Ghafar *et al.* (1995) para las condiciones de la forma número uno hasta la cuatro en la ilustración 5, y Müller (1944), Laursen (1952), Tarapore (1956), Qayoum (1960), Valentin (1968), Dietz (1972a, b) Altinbilek y Basmaci (1973), Chatterjee y Ghosh (1980), Rajaratnam (1981), Hassan y Narayanan (1985), Johnston y Halliwell (1987), y Karim y Ali (2000) para las condiciones con la forma número cuatro hasta la cinco en la ilustración 5.

Los hoyos de una socavación más profundos fueron observados para corrientes como en la forma número cinco (información presente en Ettmer, 2004). Para corrientes como en la forma número cinco ( $d \gg a$ ), la profundidad del agua abajo de las compuertas verticales no tiene gran importancia para el proceso de socavación (Karim y Ali, 2000).

Debido a esto, las siguientes investigaciones se llevaron a cabo de acuerdo con la corriente en la forma número cinco y con parámetros de construcción  $l < 1.5\Delta h$  y  $s < 0.3\Delta h$ .

**Ilustración 4. Definición de los parámetros para compuertas verticales.**



#### Ecuación principal

La extensión de la ecuación (6) a una ecuación general es presentada en la ecuación (9). El parámetro de la profundidad de socavación es el objetivo de esta investigación:  $y_e$ .

De esta manera, se ve en la ecuación (9) una ecuación principal para la descripción de la profundidad de socavación en la zona de transición:

$$\frac{y_e}{a} = \psi_1(D^*, X_g) \quad (9)$$

#### Metodología y materiales

##### Sedimentos

La investigación experimental fue efectuada con dos materiales sintéticos y con dos arenas uniformes (se seleccionaron materiales uniformes para evitar un parámetro adicional: la discontinuidad  $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ . Por la limitación de parámetros en la ecuación (9), las investigaciones del parámetro de discontinuidad se eliminan).

Las primeras dos pruebas se llevaron a cabo con granos sintéticos llamados "Acetalharz", con un diámetro de  $D_m = 2.60$  mm y una densidad de  $\rho_s = 1\,390$  kg/m<sup>3</sup>.

La arena correspondiente tiene un diámetro de  $D_{50} = 1.58$  mm y una densidad de  $\rho_s = 2\,650$  kg/m<sup>3</sup>. Ambos sedimentos tienen un parámetro de partícula de  $D^* = 38$ . Adicionalmente, la segunda prueba con

material sintético llamado "Polystyrol", con un diámetro del grano de  $D_m = 2.76$  mm y una densidad de  $\rho_s = 1\,040$  kg/m<sup>3</sup>.

La arena correspondiente tiene un diámetro de  $D_{50} = 0.82$  mm y también una densidad de  $\rho_s = 2\,650$  kg/m<sup>3</sup>. Ambos sedimentos tienen un parámetro de partícula de  $D^* = 19$ . Los parámetros característicos de todos los materiales utilizados se muestran en el cuadro 2.

En la ilustración 6 se muestra la curva granulométrica envolvente de la arena 1 y la arena 2.

Las arenas, tanto la 1 como la 2, tienen una curva granulométrica envolvente muy uniforme con  $\sigma = (D_{84}/D_{16})^{0.5} = 1.15$  y  $\sigma = 1.31$ . Los granos sintéticos fueron producidos como un material uniforme. La forma del grano Acetalharz se muestra en la ilustración 7a. Como se observa en la ilustración 7a, Acetalharz tiene una forma similar a la natural. La forma del grano Polystyrol se muestra en la ilustración 7b; en ésta, la forma es más o menos cilíndrica.

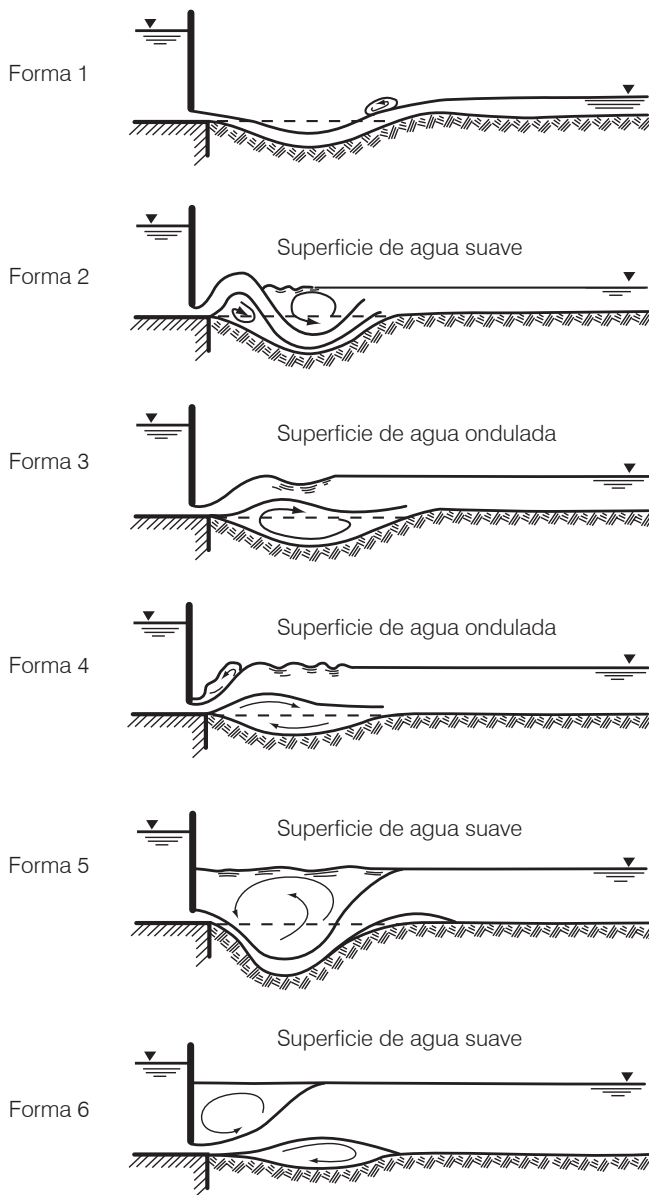
El factor de la forma es  $SF = c/(a \cdot b)^{0.5}$  con  $a$ =el eje más largo,  $b$ =el eje mediano y  $c$ =el eje más pequeño. El factor de la forma es  $SF = 0.84$  para los granos de Acetalharz y para el grano de Polystyrol  $SF = 0.75$ . Los sedimentos naturales tienen un factor de la forma aproximada de  $SF \approx 0.7$  (ASCE, 1962).

##### Investigaciones

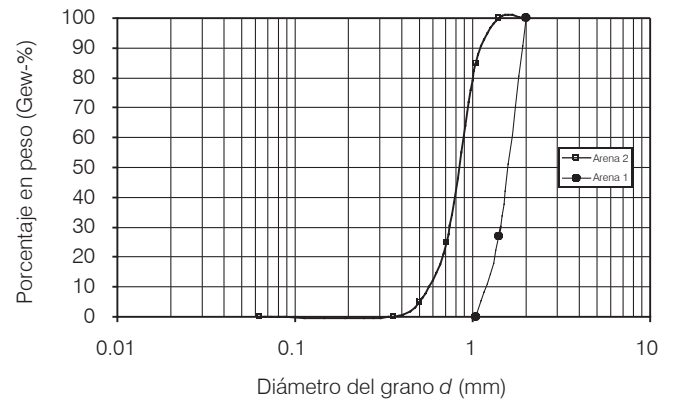
Las investigaciones experimentales fueron realizadas en el laboratorio hidráulico del Instituto Leichtweiss, Universidad Técnica de Braunschweig (ver ilustración



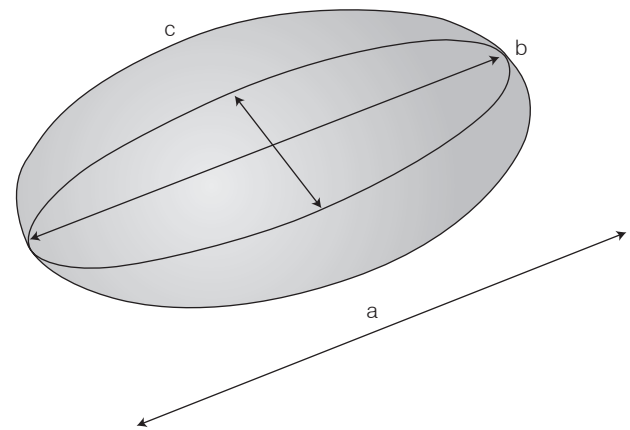
**Ilustración 5. Formas de corrientes abajo de compuertas verticales (Whittaker y Schleiss, 1984).**



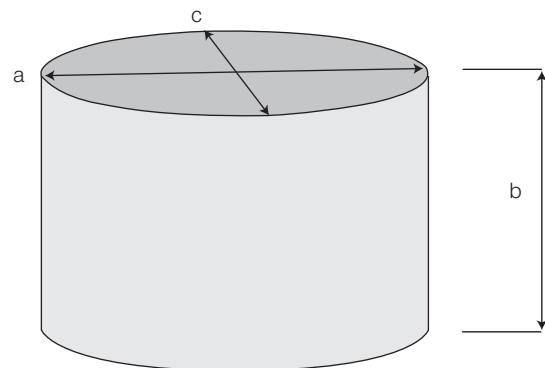
**Ilustración 6. Curva granulométrica envolvente de la arena 1 y la arena 2.**



**Ilustración 7a. Forma del grano Acetalharz.**



**Ilustración 7b. Forma del grano Polystyrol.**



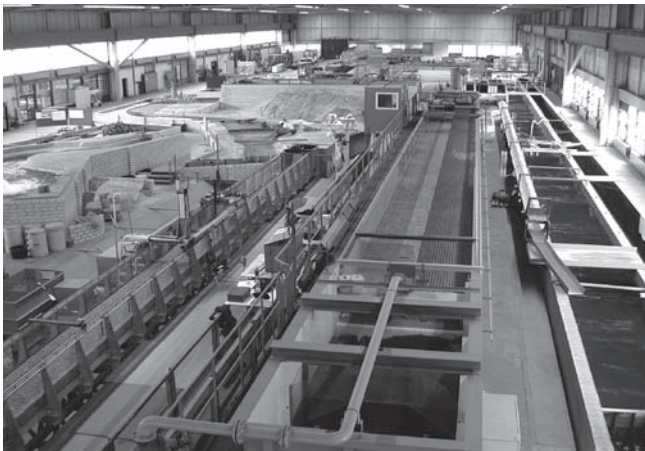
**Cuadro 2. Parámetros característicos del material utilizado.**

| Parámetro                     | Serie 1    |         | Serie 2    |         |
|-------------------------------|------------|---------|------------|---------|
| Nombre de material            | Acetalharz | Arena 1 | Polystyrol | Arena 2 |
| $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1 390      | 2 650   | 1 040      | 2 650   |
| $D_{50}$ (mm)                 | 2.60       | 1.58    | 2.76       | 0.82    |
| $D^*$ (1)                     | 38         | 38      | 19         | 19      |

8a). El canal hidráulico (11 x 0.30 x 0.60 m) utilizado tiene paredes de vidrio (ver ilustración 8b).

La descarga fue medida con un flujómetro inductivo. El nivel del agua fue medido con un nivelímetro movable y ajustado con una compuerta al final del canal hidráulico. La compuerta vertical se construyó con una corta distancia del cauce del sedimento (ver ilustración 9). El canal móvil tiene un largo de aproximadamente 4 m y una altitud de 0.20 m. Se requirieron mediciones especiales para la medida de la geometría de los hoyos de socavación. Las paredes de vidrio se cubrieron con folio transparente y una cuadrícula uniforme, como se ve en la ilustración 9. El proceso de socavación fue filmado con cámara de video y fases típicas de la socavación fueron dibujadas en la cuadrícula.

**Ilustración 8a. Laboratorio hidráulico del Instituto Leichtweiss, Universidad Técnica de Braunschweig.**



**Ilustración 8b. Vista del canal hidráulico para modelación experimental.**



Nota: las investigaciones previas muestran que las paredes de vidrio no tienen ninguna influencia en la geometría de los procesos de socavación.

## Resultados

### *Leyes de similitud*

Todos los experimentos sedimentológicos se hicieron con la misma construcción, de manera que la geometría entre las investigaciones tiene una escala de 1:1.

El objetivo fue obtener las mismas geometrías del hoyo de socavación para los diferentes materiales y poder así presentar un experimento típico (ver cuadro 3).

En la ilustración 10 se presenta la evolución del hoyo o fosa de socavación para la arena 1. El hoyo de socavación máximo se alcanzó después cuatro horas y cinco minutos.

Después de eso, la extensión del hoyo o fosa de socavación creció o se incrementó sólo a lo largo.

Después del tiempo mencionado, el hoyo de socavación no alcanzó una profundidad mayor. Por esto, se midió en distintos lapsos. Por ejemplo, una medida del hoyo de socavación después de 22 horas y 5 minutos no muestra profundidades mayores. Los resultados de la prueba dos con Acetalharz se muestran en la ilustración 11.

En este caso, la máxima profundidad de socavación se alcanzó después de dos horas y veinte minutos. La extensión del hoyo de socavación sólo creció a lo largo. No se midió ninguna profundidad mayor. La prueba se termina después de tres horas y cinco minutos.

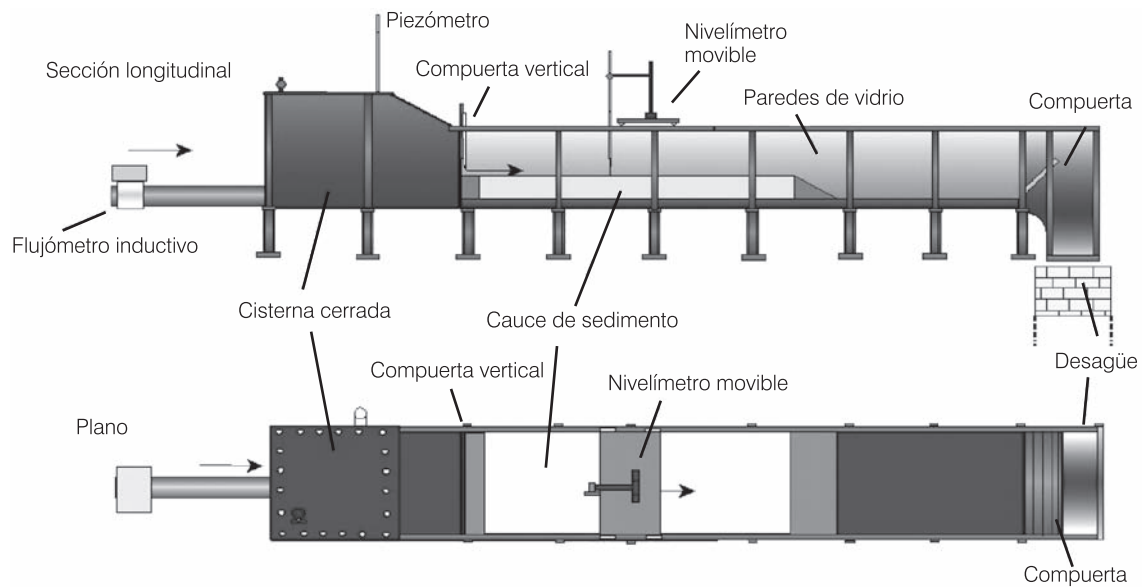
Las pruebas 1 y 2 se llevaron a cabo con dos materiales totalmente distintos y el tiempo de socavación hizo una diferencia significativa. Pero la geometría del hoyo de socavación y la máxima profundidad de socavación fueron idénticos. En ambos casos, la máxima profundidad de socavación fue de 0.075 m.

Las dos geometrías máximas se muestran en la ilustración 12. Se destaca que la geometría entre los dos materiales es idéntica. Esto significa que en dos pruebas se presentan típicos procesos hidráulicos en concordancia. De esta forma, los parámetros característicos son los mismos.

En el cuadro 4 se muestran los parámetros característicos. Primero, es evidente que los parámetros hidráulicos son diferentes. La escala básica para modelos físicos es normalmente el índice de Froude  $Fr$ . Aquí la relación de las pruebas 1 y 2 es  $Fr_1 = 1.57$  y no  $Fr_1 = 1.0$ .

La misma relación (1.57) existe entre las descargas, velocidades e índices de Reynold.

Ilustración 9. Montaje experimental.



Cuadro 3. Datos de serie 1.

| Parámetros                  | Prueba 1<br>Arena 1 | Prueba 2<br>Acetalharz |
|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| <b>Construcción</b>         |                     |                        |
| $a$ (m)                     | 0.02                | 0.02                   |
| $s$ (m)                     | 0                   | 0                      |
| $l$ (m)                     | 0.10                | 0.10                   |
| <b>Hidráulico</b>           |                     |                        |
| $Q$ (l/s)                   | 4.70                | 3.00                   |
| $u$ (m/s)                   | 0.77                | 0.49                   |
| $d_{abajo}$ (m)             | 0.20                | 0.20                   |
| <b>Sedimento</b>            |                     |                        |
| $D^*$ (1)                   | 38                  | 38                     |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 2 650               | 1 390                  |
| $D_{50}$ (mm)               | 1.58                | 2.6                    |

Ilustración 10. Evolución del hoyo o fosa de socavación, prueba 1, arena 1,  $D^*=38$ .

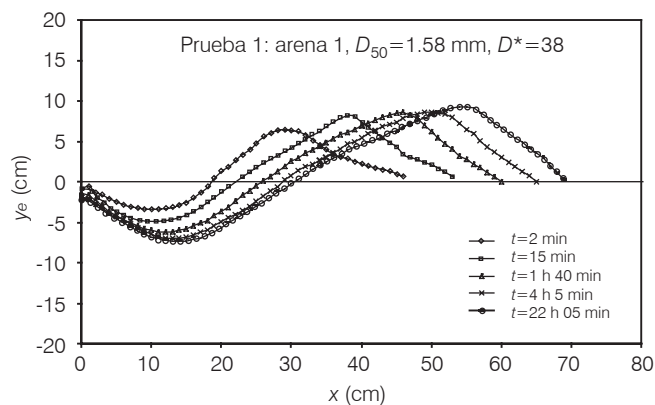


Ilustración 11. Evolución del hoyo o fosa de socavación, prueba 2, Acetalharz,  $D^*=38$ .

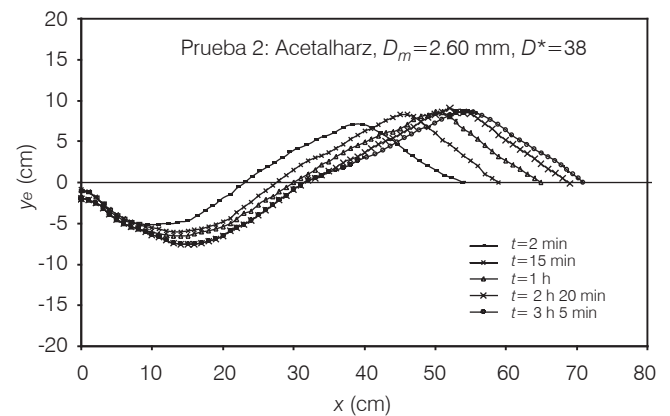
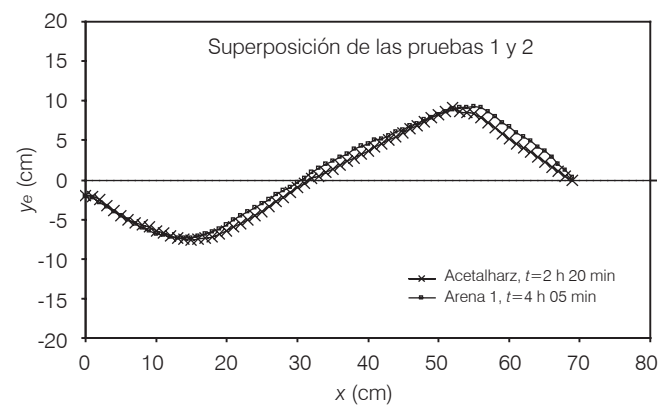


Ilustración 12. La superposición de geometrías máximas de las pruebas 1 y 2.





**Cuadro 4. Parámetros característicos y relaciones similares.**

| Parámetro                                  | Prueba 1<br>Arena 1 | Prueba 2<br>Acetalharz | Relación<br>Pr. 1/Pr. 2 |
|--------------------------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|
| <b>Relaciones hidráulicas</b>              |                     |                        |                         |
| $Q$ (l/s)                                  | 15.5                | 9.9                    | 1.57                    |
| $u$ (m/s)                                  | 0.77                | 0.49                   | 1.57                    |
| $Fr$ (1)                                   | 1.75                | 1.11                   | 1.57                    |
| $Re$ (1)                                   | 14 184              | 9 054                  | 1.57                    |
| <b>Relaciones sedimentológicas</b>         |                     |                        |                         |
| $D_{ch}$ (1)                               | 1.58                | 2.6                    | 0.607                   |
| $\Delta$ (1)                               | 1.65                | 0.39                   | 4.23                    |
| $D^*$ (1)                                  | 38                  | 38                     | 1.0                     |
| $u_{crit}$ (m/s)                           | 0.323               | 0.194                  | 1.67                    |
| $u_s$ (m/s)                                | 0.158               | 0.114                  | 1.38                    |
| <b>Relaciones de parámetros relevantes</b> |                     |                        |                         |
| $X_g$ (1)                                  | <b>48</b>           | <b>48</b>              | <b>1.0</b>              |
| $Fr_g$ (1)                                 | <b>4.83</b>         | <b>4.95</b>            | <b>0.98</b>             |
| $Re_g$ (1)                                 | <b>1 121</b>        | <b>1 177</b>           | <b>0.95</b>             |
| $y_e$ (m)                                  | <b>0.075</b>        | <b>0.076</b>           | <b>0.99</b>             |
| <b>Relaciones geométricas</b>              |                     |                        |                         |
| $a$ (m)                                    | 0.02                | 0.02                   | 1.0                     |
| $y_e/a$ (1)                                | 3.75                | 3.80                   | 0.99                    |
| $d_{abajo}$ (m)                            | 0.200               | 0.200                  | 1.0                     |
| <b>Relación del tiempo</b>                 |                     |                        |                         |
| $T$ (h-min)                                | 4 h 5 min           | 2 h 20 min             | 1.75                    |

También, las relaciones sedimentológicas varían, por ejemplo, la relación de la velocidad crítica ( $u_{crit,r}=1.67$ ) y la relación de la velocidad de descenso ( $u_{s,r}=1.38$ ) (ambas velocidades son obtenidas en pruebas preliminares).

A menudo la igualdad de la relación de  $u_{crit,r} \approx u_{s,r}$  se basa en leyes similares con materiales sintéticos (ver Mertens, 2003). En este caso, las diferencias entre las relaciones  $u_{crit,r}=1.67$  y  $u_{s,r}=1.38$  son evidentes, y los parámetros  $u_{crit,r}$  y  $u_{s,r}$  no pueden ser utilizados para una escala de sedimentos. La relación del grano con el índice de Froude y de la relación del grano con el índice Reynold fueron calculados como  $Fr_{g,r}=0.98$  y  $Re_{g,r}=0.95$ , respectivamente, acercándose así a la relación de 1:1.

La nueva definición del índice de la resistencia del grano  $X_g$  se muestra en la relación de  $X_{g,r}=1$  entre la prueba 1 y la 2. Como consecuencia, en ambos casos de las iguales profundidades máximas de socavación y de la idéntica geometría de los hoyos de socavación, una similitud de  $X_g$  significa un parámetro que permite la descripción de la interacción de la hidráulica sedimentológica en la zona de transición.

Por lo tanto, el índice de la resistencia del grano  $X_g$  sin dimensión y el diámetro de la partícula  $D^*$ , también sin dimensión, son representados por dos parámetros para definir el proceso de los hoyos de socavación en la

zona de transición hidráulica. Si la prueba 1 es llamada "natural" (índice  $N$ ) y la prueba 2 es llamada "modelo" (índice  $M$ ), puede derivarse una ley a escala de estas pruebas. Las condiciones básicas se plantean en las ecuaciones (10) y (11) :

$$D_r^* = 1 \quad (10)$$

$$X_{g,r} = 1 \quad (11)$$

La solución de la ecuación (11) se muestra en la ecuación (12):

$$D_r^* = \frac{D_N^*}{D_M^*} = \frac{\left(\frac{\Delta_N g}{v^2}\right) D_N}{\left(\frac{\Delta_M g}{v^2}\right) D_M} = \frac{\Delta_N^{1/3} D_N}{\Delta_M^{1/3} D_M} = \Delta_r^{1/3} D_r = 1 \quad (12)$$

$$\rightarrow \Delta_r = D_r^{-3}$$

Ésta denota que la relación de la densidad de los sedimentos del suelo está ligada con el diámetro del grano en  $D_r^{-3}$ . En otras palabras, la relación del diámetro del grano puede ser expresado por la relación de la densidad del material  $\Delta_r^{-1/3} = D_r$ .

Más allá, la condición 2 (ecuación (11)) demanda una similitud del índice del grano de resistencia  $X_g$  en la naturaleza y en el modelo. Así se deriva la ecuación (13):

$$X_{g,r} = \frac{X_{g,N}}{X_{g,M}} = \frac{\left(\frac{\Delta_N g D_N^2}{u_{a,N} v^2}\right)}{\left(\frac{\Delta_M g D_M^2}{u_{a,M} v^2}\right)} = \frac{\Delta_N D_N^2 u_{a,N}^{-1}}{\Delta_M D_M^2 u_{a,M}^{-1}} = \Delta_r D_r^2 u_{a,r}^{-1} = 1 \quad (13)$$

$$\text{con } \Delta_r = D_r^{-3} \rightarrow D_r^{-3} D_r^2 u_{a,r}^{-1} = 1 \rightarrow D_r^{-1} = u_{a,r}$$

La solución de la ecuación (13) muestra la relación  $D_r^{-1} = u_{a,r}$ . Demostrando con ello que la relación de la velocidad se deriva de la relación del diámetro del grano (las mismas condiciones serán derivadas con la escala del índice del grano de Froude  $Fr_{g,r}=1$  y del grano Reynold  $Re_{g,r}=1$ ).

*Relevancia de  $X_g$*

La relevancia de la resistencia del grano  $X_g$  fue descrita para el análisis de las pruebas 1 y 2 con una serie de más de 42 pruebas. Los datos de dicho análisis junto a más

de 300 resultados en la investigación para la socavación fueron representados en Ettmer (2004).

Series de pruebas con parámetros para la partícula  $D^*=38$

Para enseñar el significado de la resistencia del grano  $X_g$ , se muestran los resultados de las series de prueba con un diámetro de la partícula de  $D^*=38$ , aplicado en la ilustración 13. El diagrama presenta la profundidad relativa máxima de socavación  $y_e/a$  en relación con la resistencia del grano  $X_g$ . Las pruebas se llevaron a cabo con arena  $D_{50}=1.58$  mm y con material sintético Acetalharz  $D_m=2.6$  mm.

Como se demuestra en los resultados de las pruebas 1 y 2, en el diagrama se observa que los resultados de las pruebas en serie 1 con arena son congruentes con las pruebas en serie 2 de Acetalharz. Como se observa arriba, es posible considerar las diferentes características del material con el parámetro de la partícula  $D^*$ .

La característica de la curva confirma un descenso de la profundidad relativa de socavación  $y_e/a$ , con un ascenso de  $X_g$ , y respectivamente un ascenso de la profundidad de socavación con el descenso del índice de la resistencia del grano.

Para un diámetro del grano ascendiente crece también el índice de resistencia (todos los otros parámetros son considerados constantes). Esto significa que las fuerzas del sedimento ascienden, provocando que la fuerza de propulsión ascienda también.

Para ambos materiales, la curva presenta una característica congruente, lo cual significa que para ambos sedimentos el hoyo de socavación relativo puede ser observado en la zona de transición hidráulica para un mismo índice de resistencia del grano  $X_g$ .

Por esto, es similar la resistencia del grano sin dimensión para ambos sedimentos.

Series de pruebas con parámetros para la partícula  $D^*=19$

El diagrama con la serie de pruebas  $D^*=19$  se muestra en la ilustración 14 (arena 2,  $D_{50}=0.82$  mm y Polystyrol,  $D_m=2.76$  mm). El parámetro de la curva de la partícula  $D^*=19$  se localiza a la izquierda del parámetro de la curva de la partícula  $D^*=38$ .

Por tanto, la resistencia del grano del parámetro de la curva de la partícula  $D^*=19$  es más pequeña que la del parámetro de la curva de la partícula  $D^*=38$ .

Series de pruebas  $D^*=58$ ,  $D^*=93$  y  $D^*=139$

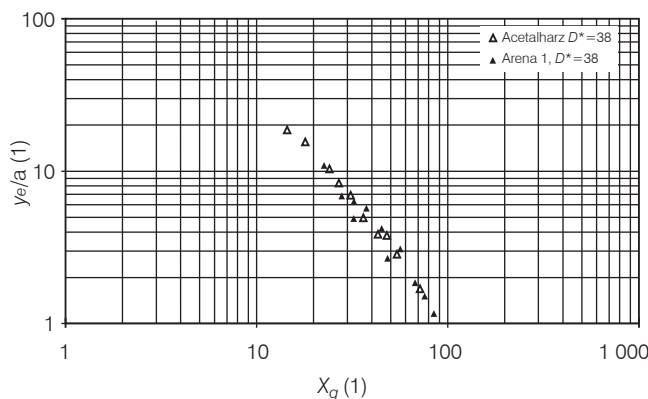
La ilustración 14 se amplió con un número extenso de pruebas, las cuales fueron tomadas de la literatura. Primero, los resultados de la prueba se seleccionaron para parámetros de partículas  $D^*$  y luego se ampliaron en los diagramas de  $X_g$ .

La ilustración 15 presenta la extensión de la ilustración 14 con datos de Qayoum (1960) para los parámetros de la curva de la partícula  $D^*=58$ ,  $D^*=93$  y  $D^*=139$ .

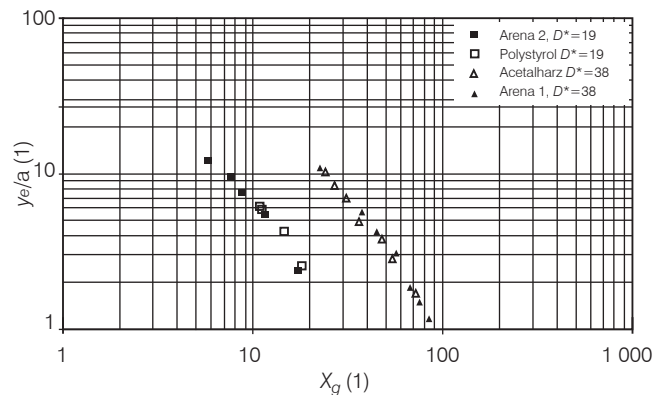
Los resultados fueron clasificados de acuerdo con el tamaño del parámetro de la partícula  $D^*$ . Por tanto, la resistencia del sedimento crece con ascenso del parámetro de la partícula y la profundidad de socavación relativa decrece con el incremento del índice de la resistencia del grano  $X_g$ . Por esto, los resultados de Qayoum afirman las características típicas de la curva en las series de las pruebas  $D^*=19$  y  $D^*=38$ .

Adicionalmente, los resultados de Straube (1963), Altinbilek y Basmaci (1973) (a.o. investigaciones con

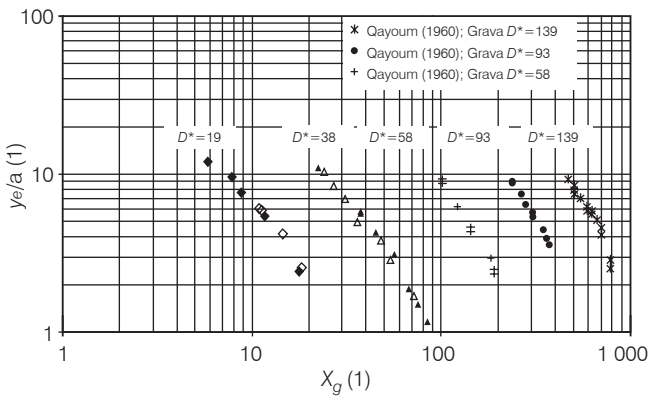
**Ilustración 13. Serie 1 de las pruebas con el parámetro de la partícula  $D^*=38$ .**



**Ilustración 14. Serie 1 y serie 2,  $D^*=38$  y  $D^*=19$ .**



**Ilustración 15. Extensión de  $D^*=58$ ,  $D^*=93$ ,  $D^*=139$ .**



materiales sintéticos con la densidad de  $1\,300\text{ kg/m}^3$ , así como los resultados de Rajaratnam (1981) fueron ajustados. Rajaratnam utilizó materiales sintéticos y aire como líquido. Por tanto, los resultados se ajustaron a la variación de la densidad relativa y, en pruebas particulares, a la variación de la viscosidad cinemática (ver ilustración 16).

La consideración de los resultados arriba mencionados destaca que la serie de pruebas de Altinbilek y Basmaci con parámetros para partículas de  $D^*=158$  son congruentes con los parámetros de la curva de la partícula  $D^*=139$ . En la curva se identifica la delimitación entre la zona de transición hidráulica y la zona de aspereza, que se fija aproximadamente con el parámetro de la partícula  $D^*=150$ . La delimitación de arriba puede ser confirmada con más resultados, por ejemplo, con los resultados de Straube (1963) para un parámetro de la partícula  $D^*=260$ .

Esta curva contiene características congruentes con el parámetro de la curva de la partícula  $D^*=139$  y  $D^*=158$ . Como consecuencia, el diagrama sin dimensión  $y_e/a = f(D^*, X_g)$  enseña la delimitación entre la zona de

transición hidráulica y la zona de aspereza de acuerdo con la profundidad de socavación relativa.

Como un resultado de la progresión de las curvas, se enfoca en el diagrama que la zona lisa hidráulica se presenta para un pequeño índice de resistencia del grano  $X_g$  (no hubo datos para la socavación de zonas hidráulicas lisas). Con un incremento de  $X_g$  aparece la zona de transición hidráulica y se extiende hasta la delimitación con el parámetro de la curva de la partícula  $D^*\approx 150$ . A la derecha de la delimitación se desarrolla la zona hidráulica áspera. Como se muestra arriba, los resultados de Qayoum ( $D^*=139$ ), Altinbilek y Basmaci ( $D^*=158$ ) y Straube ( $D^*=260$ ) fueron adaptados de una manera aproximada en una curva.

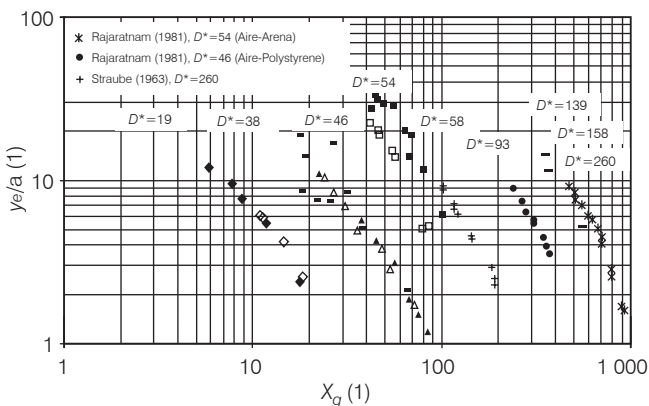
Se anotan los resultados del flujo de paso del aire con la arena y el flujo de paso del Polystyrol. Los resultados de las investigaciones se seleccionaron de la misma forma que los parámetros de la curva de las partículas. Esto significa que una fuerte variación de la viscosidad cinemática también puede ser representada por el índice de la resistencia del grano  $X_g$ . La forma de aproximación expuesta parece ser una manera adecuada para visualizar los efectos quinemáticos de los procesos observados.

## Conclusión

El pronóstico de la socavación local abajo de compuertas verticales contiene ciertos problemas, especialmente por sedimentos finos. Un cálculo de la profundidad máxima de socavación presenta numerosas variaciones en la misma. Además, existen problemas con la escala de sedimentos finos para la predicción de un hoyo o fosa de socavación con ayuda de un modelo físico. Por tanto, los sedimentos sintéticos frecuentemente se utilizaron como material del suelo y los materiales sintéticos se relacionaron con la zona de transición hidráulica. Por esto, la viscosidad cinemática obtiene influencia del proceso sedimentológico hidráulico. Se ha demostrado que el proceso de socavación puede ser sustancialmente descrito por dos parámetros sin dimensión: el parámetro de la partícula  $D^*$  y el nuevo índice de la resistencia del grano  $X_g$ . Se presenta la relevancia física de  $X_g$  y se muestra que la influencia de la viscosidad cinemática en la zona de transición hidráulica puede ser visualizada de acuerdo con la profundidad de socavación.

Además, la ley de la escala para materiales sintéticos se presenta en la zona de transición. La ley de la escala fue confirmada por diferentes resultados y se destaca que la zona de transición puede ser visualizada desde el parámetro de la partícula  $D^*=150$ . La ecuación mencionada anteriormente permite una aplicación más

**Ilustración 16. Extensión para  $D^*=46$ ,  $D^*=54$ ,  $D^*=260$ .**



fiable en un modelo de socavación. Como resultado de las curvas características, los diagramas muestran que para inferiores valores de resistencia,  $X_g$ , de los granos, se presenta una zona suave hidráulica (no se dispusieron de datos de socavación para la zona hidráulica suave). Con mayores valores  $X_g$ , aparece la zona de transición hidráulica y se extiende hasta alcanzar el límite con la curva paramétrica de la partícula  $D^* \approx 150$ . A la derecha del límite se desarrolla la zona de rugosidad hidráulica. Tal como se mostró anteriormente, los resultados de Qayoum ( $D^* = 139$ ), Altinbilek y Basmaci ( $D^* = 158$ ), y Straube ( $D^* = 260$ ) fueron aproximadamente adaptados en una curva. Para una partícula de diámetro mayor que  $D^* > 150$ , parece que la profundidad de erosión relativa es independiente de las menores dimensiones del parámetro de la partícula,  $D^*$ , lo cual puede ser visualizado hasta el parámetro de la partícula  $D^* = 150$ , de aquí que la ecuación mencionada puede ser aplicada para un modelo confiable de ensayo de socavación.

Los resultados de muchos experimentos indican que los dos índices  $D^*$  y  $X_g$  son muy importantes para la transmisión de dicho movimiento y para la descripción del fenómeno hidráulico-sedimentológico.

Recibido: 03/07/2008

Aprobado: 09/02/2009

## Referencias

- ALTINBILEK, H.D. and BASMACI, Y. *Localized scour at the downstream of outlet structures*. International Congress on Large Dams, Madrid, 1973, pp. 105-122
- ALVARADO-ANCIETA, C. y ETTMER, B. Agradación y degradación del río Piura - realineamiento del cauce principal inferior, fenómeno El Niño, Perú. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 3, octubre-diciembre de 2008, pp. 5-28.
- ASCE. Howard, C.D.C. Discussion of: Sediment transportation mechanics. Introduction and properties of sediment, progress report of the task committee on preparation of sedimentation manual of the Committee on sedimentation of the hydraulics division, Vito A. Vanoni, Chmn, *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE, Vol. 88, No. HY6, Proc. Paper No. 3338, Nov., 1962, pp. 235-237.
- BREUSERS, H.N.C. Conformity and time scale in two dimensional local scour. *Proc. Symposium on Model and Prototype Conformity*. Vol. 1-8. Hydraulic Research Laboratory, Poona, 1966.
- BREUSERS, H.N.C. and RAUDKIVI, A.J. *Scouring*. Rotterdam/Brookfield: A.A. Balkema Publishers, 1991.
- DIETZ, J.W. *Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlenmaterialien bei strömendem Abfluß*. Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik. Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratorium. Universität Karlsruhe, Mitteilungen, Heft 155. Herausgeber: Professor Dr.-Ing. E. Mosonyi, Karlsruhe, 1969.
- DIETZ, J.W. Modellversuche über die Kolkbildung. *Die Bautechnik*. Heft 5, 1972a, pp. 162-168.
- DIETZ, J.W. Modellversuche über die Kolkbildung. *Die Bautechnik*. Heft 7, 1972b, pp. 240-245.
- DIETZ, J.W. Sicherung der Flußsohle unterhalb von Wehren und Sperrwerken. *Wasserwirtschaft*. Heft 63, 1973, pp. 76-83.
- DIETZ, J.W. Zur Frage der Nachbildung von Kolkvorgängen im Modell. *Zusammenfassung, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. Nr. 40, 1976, pp. 73-84.
- DIETZ, J.W. Eidersperrwerk. Natur- und Modellversuche. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 131. Jahrgang. Nr. 4, 1994.
- DORER, H. Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellen. *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. Nr. 54, 1984.
- ETTMER, B. *Untersuchungen zu Kolkprozessen hinter dem unterströmten Schütz*, Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2004.
- GÜNZEL, W. *Modelle geschiebeführender Flüsse mit hydraulisch rauher Sohle, Darlegung der Modelltechnik am Beispiel des Flusse Neumagen*, 150. Arbeit aus dem Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium, Technische Hochschule Karlsruhe, 1964.
- HASSAN, N.M.K.N. and NARAYANAN, R. Local scour downstream of an apron. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 111, no. 11, 1985, pp. 1371-1385.
- HOWARD, C.D.C. Discussion of sediment transportation mechanics. Introduction and properties of sediment. Progress report of the Task Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division. Vanoni, Vito A. (editor). *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE. Vol. 88, no. HY6. Procedure Paper no. 3338, November, 1962, pp. 235-237.
- JOHNSTON, A.J. Scourhole developments in shallow tailwater. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 28, no. 3, 1990, pp. 341-354.
- JOHNSTON, A.J. and HALLIWELL, A.R. Local scour caused by submerged jets. Discussion on Paper 9077. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Part 2, no. 83, December, 1987, pp. 875-886.
- KARIM, O.A. and ALI, K.H.M. Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 38, no. 4, 2000, pp. 279-287.
- KOBUS, H. Wasserbauliches Versuchswesen. *Mitteilungsheft*. Nr.4 DVWW Deutscher Verband für Wasserwirtschaft. Arbeitsausschuß "Wasserbauliches versuchs- und Meßwesen", 1978.
- MERTENS, W. *Über die Deltabildung in Stauräumen*, Mitteilungen. Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 91, 1987.

- MERTENS, W. *Anwendung und Bedeutung der Dimensionsanalyse im experimentellen Wasserbau*. Manuskript zur Vorlesung. Technische Universität Braunschweig. Leichtweiß-Institut für Wasserbau (Veröffentlichung in Vorbereitung), 2002.
- MERTENS, W. Kap. 6 Physikalische Transportmodelle. In *ATV-DVWK-Arbeitsbericht*. ATV-DVWK-Arbeitsgruppe WW-2.4 Feststofftransportmodelle, Feststofftransportmodelle in Fließgewässern, 2003, pp. 225-238.
- OERTEL JR., H. *Prandtl-Führer durch die Strömungslehre*. Grundlagen und Phänomene. 11. Überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2002.
- QAYOUM, A. *Die Gesetzmäßigkeit der Kolkbildung hinter unterströmten Wehren unter spezieller Berücksichtigung der Gestaltung eines beweglichen Sturzbettes*. Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau und Grundbau der Technischen Hochschule Braunschweig. Heft 60/1, 1960.
- RAJARATNAM, N. Erosion by plane turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 19, no. 4, 1981, pp. 339-358.
- RAJARATNAM, N. and MACDOUGALL, R.K. Erosion by plane wall jets with minimum tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 109, no. 7, 1983, pp. 1061-1064.
- SCHLICHTING, H. *Grenzschicht-Theorie*. 5. Karlsruhe: Auflage, Verlag G. Braun, 1965.
- SHIELDS, A. *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*. Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin. Heft 26. Eigenverlag der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Berlin NW87, 1936.
- SHALASH, M.S.E. *Die Kolkbildung beim Ausfluß unter Schützen, Einfluß einer Befestigungsstrecke und einer Sohlenstufe unterstrom des Auslasses*, Dissertation. Fakultät für Bauwesen der Technischen Hochschule München, 1959.
- STRAUBE, C. *Die Kolkbildung hinter unterströmten Wehren*. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt. Wasser- und Grundbau, Berlin. Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, Heft 9, Berlin, 1963.
- VAN RIJN, L.C. Sediment transport. Part I, bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 110, no. 10, October, 1984, pp. 1431-1456.
- WHITTAKER, J.G. und SCHLEISS, A. Scour related to energy dissipators for high head structures, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau. *Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich*. Nr. 73, Zurich, 1984.
- YALIN, M.S. Über die Naturähnlichkeit der Geschiebebewegung bei Modellversuchen. *Die Bautechnik*, 36. Jahrgang. Heft 3, 1959, pp. 96-99.
- YALIN, M.S. Similarity in Sediment Transport by Currents. *Hydraulics Research*. Paper No. 6. Hydraulics Research Station, Wallingford, Berks, 1965.
- YALIN, M.S. *Theory of hydraulic models*. London and Basingstoke: Macmillan Civil Engineering Hydraulics, 1971.
- ZANKE, U. *Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport. Teil 2: Berechnung des Sedimenttransportes hinter befestigten Sohlenstrecken - Sonderfall zweidimensionaler Kolk-*. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover. Heft 48, Hannover, 1978, pp. 1-95.
- ZANKE, U. *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Heidelberg, New York: Springer-Verlag Berlin, 1982.



### Abstract

ETTMER, B., ALVARADO-ANCIETA, C.A. & RAMÍREZ-BERNINI, P. *Erosion near hydraulic structures - Prediction and similarity laws in hydraulic models with fine sediments*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIV, no. 4, October-December, 2009, pp. 23-36.

*The knowledge of erosion processes and the maximum scour depth near hydraulic structures is crucial for applying design criteria for weirs, bridges, piers etc. Until now, there is no standard approach to be found in the literature for the estimation of the maximum scour depth. In contrast, the calculation of a scour hole includes a large range of variations for the calculated maximum depth and the scouring time, especially for fine sediments. Thus, model tests were carried out to predict the maximum scour depth with an applied physical model. Unfortunately, the scaling of sediment characteristics, in particular the scaling of fine sediments, includes different problems. Frequently, lightweight materials were used as model sediment. Experiments were carried out in the laboratory of the Leichtweiss-Institute for Hydraulic Engineering to investigate the scouring process behind a vertical gate. Therefore, sand and synthetic pellets were used as movable bed material. The data indicate the existence of similarity laws for the interaction sediment-flow field-erosion process in the transition zone.*

**Keywords:** scour, erosion; fine sediments, similarity laws, hydraulic structures.

### Dirección institucional de los autores:

*Dr. Bernd Ettmer*

Universidad Polytécnica Magdeburg  
Departamento de Ingeniería Hidráulica  
Breitscheidstraße 2  
39114 Magdeburg, Alemania  
teléfono: + (49) (391) 886 4429  
fax: + (49) (391) 886 4430  
bernd.ettmer@hs-magdeburg.de  
www.hs-magdeburg.de

*Dr. César Adolfo Alvarado-Ancieta*

Ingeniero Consultor de Obras Hidráulicas e Ingeniería de Ríos en  
Alemania y Perú  
teléfonos: + (49) 1520 4584 935, + (511) 4763 710  
cesalv@yahoo.com  
www.freewebs.com/alvarado-ancieta

*Ing. Paula Ramírez-Bernini*

Laboratorio de Hidráulica del Instituto Leichtweiss de Obras  
Hidráulicas  
Universidad Técnica de Braunschweig  
Beethovenstraße 51<sup>a</sup>  
38106 Braunschweig, Alemania  
pauliramirez@gmail.com  
www.lwi.tu-bs.de