

# El fenómeno del acorazamiento y su influencia en el arrastre de sedimentos

Jorge Reyes-Salazar  
Bernardo Domínguez-Covarrubias

Pontificia Universidad Católica de Chile

*El acorazamiento es un fenómeno natural que se presenta cuando el cauce tiene granulometría extendida y el esfuerzo cortante producido por el escurrimiento es menor que el esfuerzo que pueden resistir los granos más grandes de sedimento y mayor del que pueden soportar las partículas más pequeñas. Esto produce que en el fondo del cauce se incremente el número de partículas más gruesas no arrastradas y se forme una capa denominada coraza, predominando material de menor tamaño en el transporte de sedimentos. El arrastre de fondo en los ríos es muy influenciado por la presencia de este fenómeno debido principalmente al aumento del esfuerzo resistente y del diámetro medio de partículas. Esto es motivo suficiente para descartar la aplicación directa de métodos de arrastre de sedimentos muy difundidos. El objetivo de este artículo es determinar primeramente el estado del arte del tema, luego presentar los resultados obtenidos de investigaciones experimentales realizadas, consistentes en el desarrollo en el tiempo de dicho fenómeno y de su influencia en el arrastre de sedimentos. Además se exponen las modificaciones a fórmulas de mayor difusión para mejorar sus resultados.*

**Palabras clave:** coraza, arrastre de sedimentos, fluvial

## Antecedentes generales

### Arrastre de sedimentos

Según su comportamiento, al ser transportado por el flujo, el sedimento se puede clasificar en dos grandes grupos: el de fondo y el de lavado (muy fino). El material de fondo puede ser arrastrado dentro de la capa de fondo y también puede ser transportado en suspensión fuera de la capa de fondo. Este estudio se centrará en el arrastre dentro de la capa de fondo, para lo cual se utilizará el criterio de Einstein (1950), que dice que el espesor de la capa de fondo es igual a dos veces el diámetro la partícula considerada.

### Fenómeno del acorazamiento

Si se tiene un cauce de un río formado con sedimentos de granulometría extendida y se está produciendo arrastre de sedimentos, se puede dar el caso de que

el esfuerzo cortante producido por el escurrimiento sea menor que el esfuerzo que pueden resistir los granos más grandes, por lo que en el transporte de sedimentos predomina material de menor tamaño. Esto produce que, en el fondo del cauce, se incremente el número de partículas más gruesas no arrastradas y se forme una capa denominada coraza. Los valores del arrastre de fondo en los ríos con granulometría extendida son muy influenciados por la presencia del fenómeno del acorazamiento debido principalmente al aumento del esfuerzo resistente, al cambio del diámetro medio de partículas y al cambio de la rugosidad. Esto es motivo suficiente para descartar la aplicación directa de métodos que consideran granulometría uniforme.

Características del sedimento de fondo para la formación de la coraza

El material de fondo debe tener una curva granulométrica extendida, con desviación estándar geométrica  $\sigma_g \geq 2$ . Para

determinar la influencia de la distribución geométrica en la formación de la coraza se han efectuado diferentes corridas teniendo todas el mismo  $D_{50}=3$  mm y sólo se ha cambiado la desviación estándar de 1.2, 2 y 3; los resultados obtenidos demostraron que el diámetro del material de fondo se mantuvo para la desviación 1.2, y que llegó a 6 mm para la desviación 2; para la desviación 3 alcanzó los 9.5 mm. En conclusión, el acorazamiento no se formó para la desviación de 1.2 y sí para las desviaciones mayores de 2.

#### Características del flujo para la formación de la coraza

Ahora se analiza el caso en que el flujo se va incrementando y por lo tanto aumentará la tensión cortante sobre los sedimentos de fondo.

Si el flujo no es muy intenso, será capaz de arrastrar sólo las partículas más pequeñas; si esto ocurre, el diámetro medio de la granulometría del material que permanece formando la coraza será un poco mayor que el diámetro medio del material original y en esta situación no existe coraza. A medida que la intensidad del flujo aumenta, la corriente arrastra partículas más grandes y el diámetro medio de la coraza irá también aumentando; en este estado se afirma que existe la coraza; en el caso que la tensión cortante sea muy alta, puede producirse el rompimiento de la coraza.

#### Estado del arte del arrastre de sedimentos

En cuanto a los distintos enfoques de los métodos de cálculo de arrastre, por un lado existen aquellos que han sido deducidos a partir de experimentos con granulometría uniforme y, por lo tanto, no pueden tomar en cuenta el acorazamiento; por otro lado, los métodos deducidos utilizando granulometría extendida, pero que calculan el arrastre en función de uno o varios diámetros representativos y constantes en el tiempo, u otros modelos que sólo predicen las curvas granulométricas finales de la coraza y del material arrastrado, en condiciones de equilibrio. Estos tres tipos de modelos no tienen la posibilidad de determinar directamente el arrastre producido ni su evolución en el tiempo.

#### Métodos de cálculo del arrastre de fondo sin considerar el acorazamiento

Usando los criterios de velocidad y esfuerzo de corte críticos, existen numerosos enfoques matemáticos y estadísticos, a partir de experimentos o mediciones de campo, para desarrollar modelos de predicción de

arrastre. La mayoría de los métodos propuestos se han hecho con material de granulometría uniforme.

Se presenta una recopilación cronológica efectuada por Maza y García (1996) de los métodos propuestos para calcular el arrastre teniendo granulometrías uniformes:

- Los métodos para cuantificar únicamente el arrastre en la capa de fondo (Du Boys, 1879; Straub, 1935; Schoklitsch, 1914; Shields, 1936; Meyer-Peter y Müller, 1948; Einstein, 1942; Einstein-Brown, 1950; Yalin, 1963, y Bogardi, 1955).
- Los métodos para cuantificar el transporte de fondo, sin distinguir el arrastre en la capa de fondo y el transporte en suspensión (Laureen, 1958; Colby, 1964; Bishop, Simons y Richardson, 1965; Engelund y Hansen, 1967; Yang, 1973; Ranga-Raju, 1981, y Mora, Aguirre y Fuentes, 1990).
- Los métodos que separan el arrastre de la capa de fondo y el sedimento transportado en suspensión de Einstein (1950); Baynold (1966); Chang, Simons y Richardson (1967); y Van Rijn (1984).

En cuanto a las condiciones experimentales, conviene recalcar que los métodos más utilizados, como son los de Meyer-Peter y Müller, y de Shields, usaron principalmente diámetros uniformes en el rango de 0.4 a 3 mm, y 1.56 a 2.57 mm, respectivamente, aunque también probaron con material no uniforme, tal es el caso de Meyer-Peter y Müller en su tercera y cuarta serie de ensayos. Además, los experimentos reportados por los autores mencionados difieren en los valores de caudales, diámetros y pendientes.

#### Métodos de cálculo del arrastre de fondo con influencia del acorazamiento

Berezowsky y Jiménez (1992) presentan una revisión de los métodos para calcular el acorazamiento; de estos, se ha considerado importante mencionar los siguientes:

- Du Buat, en 1796, fue el primero en publicar una descripción cualitativa del acorazamiento.
- Harrison, en 1950, realizó los primeros ensayos de acorazamiento, concluyendo que la acumulación de partículas inmóviles incrementa la rugosidad efectiva y disminuye la erosión, y que el perfil longitudinal del fondo, al final del proceso, tiende a ser paralelo al del perfil de inicio.
- Gessler propuso, en 1967, el método en el que se considera el movimiento incipiente como un fenómeno aleatorio y el esfuerzo cortante en el fondo fluctuante alrededor de un valor medio en el tiempo.

Gessler investigó la probabilidad de que granos de un tamaño específico se queden inmóviles.

- Borah et al., en 1982, propusieron dividir la zona de mezclado en varias capas; la que está en contacto con el flujo se considera como la capa activa.
- Masconi y Subas, en 1986, estudiaron la evolución del proceso y la ruptura de la coraza.
- Karim y Holly investigaron, en 1986, la formación de la coraza.
- Holly y Rahuel (1990) propusieron un modelo matemático tomando en cuenta los conceptos de Borah et al.

Por otro lado, Parker y Sutherland (1990) predijeron la composición granulométrica de la capa superficial acorazada.

Efectuando un análisis crítico de estos métodos se mencionan las siguientes limitaciones:

- a) No permiten estimar el tiempo en que se forma la coraza; algunos investigadores han trabajado en este punto para distribuciones específicas de los sedimentos (Berezowsky y Jiménez, 1992).
- b) Se aplican mientras el esfuerzo cortante crítico máximo no es sobrepasado.
- c) No explican su independencia con el número de Reynolds de la partícula.
- d) No consideran las formas del lecho ni los rangos de granulometría. Los diámetros  $D_{50}$  y  $D_{35}$  representan el comportamiento de todo el lecho.
- e) Están desarrollados para concentraciones bajas y no consideran que los resultados varían de acuerdo con el área acorazada (Worman, 1992).

Con respecto al cálculo del gasto sólido medio, las ecuaciones presentadas en la bibliografía son claramente aplicables cuando el material es de características uniformes y permanentes en el tiempo. Sin embargo, la dificultad en el cálculo del arrastre de sedimentos se debe a la intervención de varios fenómenos combinados como la aleatoriedad de la turbulencia, el hidrograma de avenidas, la variación de los tirantes y velocidades en la sección transversal y en el perfil longitudinal, y la presencia de granulometría extendida. Tales limitaciones abren las posibilidades de investigar la influencia del acorazamiento en el arrastre de sedimentos para la aplicación de fórmulas que permitan considerar el tiempo como una variable en el transporte. Dicha investigación se realizó utilizando técnicas experimentales que permitieron medir bajo condiciones controladas los parámetros hidráulicos y sedimentológicos característicos.

## Alcances y objetivos de la investigación

De los antecedentes expuestos surgen dos líneas principales a investigar: una de ellas es el conocimiento y la modelación del fenómeno mismo del acorazamiento, para el cual se requiere la caracterización hidrodinámica del flujo a una microescala. La segunda línea, que es a la que está dirigida esta investigación, consiste en investigar el acorazamiento en cuanto a su formación y a su influencia en el arrastre de sedimentos, en un enfoque de aplicación ingenieril. Evidentemente, ambos enfoques son complementarios para profundizar en el conocimiento del fenómeno de acorazamiento de cauces.

El aporte al conocimiento de esta línea es la obtención de un método que se basa en mediciones directas del arrastre, analizando simultáneamente la evolución de la coraza y de la curva granulométrica de fondo en el tiempo. Con esta información se podrán realizar predicciones del arrastre, inclusive en el caso de analizar un hidrograma de avenidas. Con el conocimiento actualmente disponible esto es imposible, porque los métodos se basan en obtener la curva granulométrica arrastrada en equilibrio para cada caudal; sin embargo, en un hidrograma real, en la mayoría de los casos los caudales no llegan a alcanzar su estado de equilibrio en el arrastre. Las fórmulas actuales no toman en cuenta que al acorazarse un río tiende a generar mayores esfuerzos en las riberas.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia del acorazamiento en el proceso de arrastre de sedimentos en ríos de fuerte pendiente y granulometría extendida. Para el cumplimiento de este objetivo se debe realizar lo siguiente:

- Establecer relaciones entre el caudal sólido y el diámetro representativo de la curva granulométrica de fondo, mediante mediciones experimentales; esto permitirá estimar aquel diámetro que entregue la mejor representatividad en la determinación del arrastre final.
- Obtener el tiempo en que se forma la coraza y la tasa de arrastre variable en el tiempo.
- Introducir la fórmula de Meyer-Peter y Müller (1948), que no considera acorazamiento o el diámetro variable en el tiempo.
- Encontrar un diámetro, el cual, al utilizarlo con las fórmulas tradicionales que no consideran acorazamiento, nos permita obtener valores del arrastre con presencia de acorazamiento.

## Hipótesis de trabajo

Las principales hipótesis son las siguientes: la tasa de arrastre es variable en el tiempo; el esfuerzo cortante en el fondo es constante debido a que en todo momento se mantendrá el flujo uniforme; el fenómeno del acorazamiento se produce cuando el cauce tiene una granulometría con desviación estándar geométrica mayor o igual a dos.

## Estudio experimental

### Descripción de la metodología a utilizar

La metodología propuesta es teórico-experimental debido a que se realizarán experiencias en condiciones debidamente controladas.

Para determinar ambas funciones se tomaron muestras del fondo del cauce en varias secciones y a lo largo del tiempo, en intervalos fijos hasta alcanzar el estado de equilibrio. Con ello se obtuvo la variación del diámetro en función del tiempo, calibrando la función diámetro =  $f$  (tiempo).

Simultáneamente se ha medido el caudal sólido a la salida del canal y se observó que éste fue disminuyendo debido al acorazamiento.

### Condiciones generales de los ensayos en laboratorio

No se ha publicado una metodología única para la realización de experimentos de este tipo y de su validación; inclusive se observa que los investigadores no presentan en detalle los procedimientos empleados. La revisión bibliográfica relativa a los métodos de cálculo

de arrastre de fondo y de modelos de predicción, y la consulta a expertos en el tema, ha permitido establecer la metodología de trabajo.

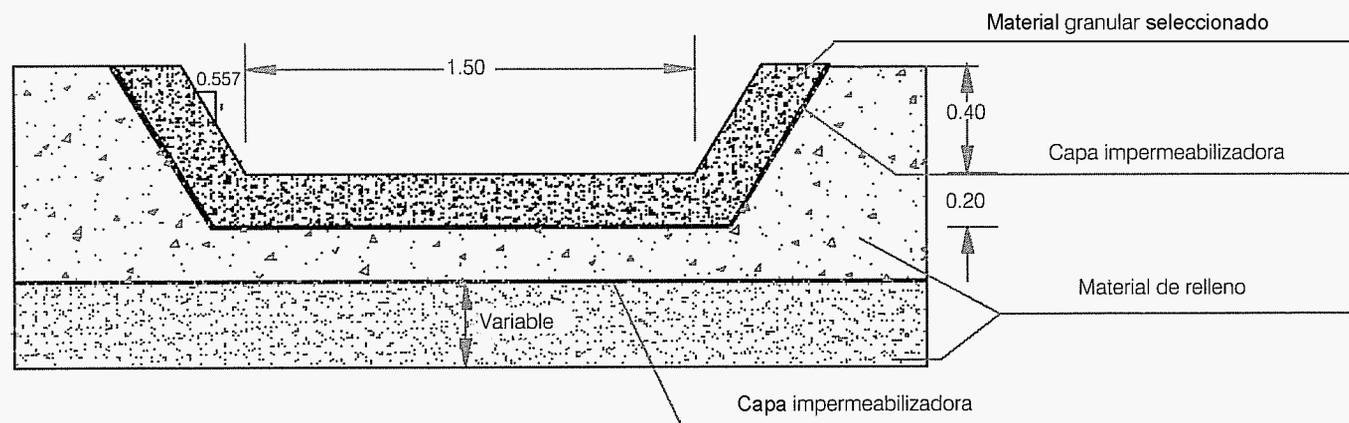
La infraestructura que se utilizó consiste en un sistema de recirculación de caudal: bombas, tanque elevado, tuberías, tanque de aquietamiento y sistema de medición de caudal líquido y sólido (vertederos, pozas). Para la medición de velocidades se usó un microcorrentómetro, y para determinar la variación de diámetro en el tiempo fue necesario realizar detenciones periódicas de los ensayos para la extracción de muestras del fondo.

Las características físicas del canal de prueba son de 1.50 m de ancho y 15 m de largo; los taludes y fondo se representaron con el mismo material de fondo, y el espesor de la capa con material móvil fue de 0.20 m (ilustración 1). Se debe recalcar que gran parte de las investigaciones realizadas en diversos países han sido efectuadas en canales con paredes de vidrio, las cuales influyen debido a que tienen distinta rugosidad.

Las condiciones generales planteadas para los ensayos son: caudal, línea de energía, pendiente del fondo y altura de agua constantes; líneas de corriente paralelas con una buena distribución de caudal en toda la sección transversal; curva granulométrica con distribución log-normal, conociendo su porosidad. La altura de agua se mantuvo constante mediante mecanismos adecuados, tales como dos compuertas al final del canal. En el canal se tuvieron tres secciones de control para evaluar los parámetros medios del flujo y el arrastre de fondo, ubicadas a 4, 8 y 12 m aguas abajo del ingreso.

Los ensayos se han realizado combinando valores de caudales, pendientes y curvas granulométricas. Los

Ilustración 1. Sección transversal del canal de prueba.



caudales utilizados son de 120, 160, 200 y 250 l/s; las pendientes, de 0.5, 0.9, 1.2 y 2%; y los materiales con distribución log-normal con diámetros medios de 10.21, 16.65 y 24.3 mm, y desviaciones estándar geométricas de 2.02, 2.05 y 2.25, respectivamente.

Las combinaciones seleccionadas de las variables anteriores generan alturas de agua entre 0.09 y 0.17 m, y números de Froude en el rango de 0.6 a 0.8.

A manera de presentar una referencia sobre los rangos de aplicación, se presentan los diámetros con los que trabajaron algunos investigadores: Straub (1935) utilizó diámetros entre 0.1 y 4 mm; Schoklitsch (1914), entre 0.1 y 3 mm; Shields (1936), entre 1.56 y 2.47 mm, con anchos de canal de 0.40 y 0.80 m; Meyer-Peter y Müller (1948), 0.4 a 30 mm, y Einstein (1942), 0.3 mm a 30 mm.

#### Descripción de las técnicas de medición propuestas

El material sólido se incorporó durante los ensayos al inicio del canal en cantidades y granulometría similares al transporte del material sólido que se iba registrando. Inicialmente dicho material tenía las mismas características que la capa de fondo sin acorazar.

La determinación del arrastre en el tiempo se hizo mediante una poza al final del modelo físico y simultáneamente se registró la variación de la curva granulométrica en las tres secciones de control, extrayendo muestras del material del fondo, previa detención del ensayo, cada cierto tiempo desde el inicio del mismo hasta lograr el máximo acorazamiento. Estos tiempos fueron normalmente a los veinte, cuarenta y sesenta minutos, y a las dos, cinco, ocho y diez horas de iniciado el ensayo. La detención del ensayo se hizo adecuadamente para no provocar erosiones. Para ello, cumplido el tiempo correspondiente, se cerraba la compuerta, cortando el flujo de agua y permitiendo el desagüe hasta dejar seco el canal.

Existen diversas técnicas para la toma de muestras de fondo; en este caso se realizó el muestreo superficial. Esta técnica consiste en marcar con pintura todo el material expuesto en la superficie para luego retirarlo, y proceder a tamizarlo y pesarlo (Martín, 1997). La superficie a marcar en la toma de muestras fue de 0.50 m de ancho por 1.50 m de longitud, correspondientes al ancho del canal.

Para la medición de velocidades en cada una de las tres secciones hidrométricas, se conformó una malla de medición: tres verticales, en el centro, derecha e izquierda, con dos puntos de medición por vertical (a 0.2 y 0.60 h; donde h representa el tirante de agua).

## Resultados obtenidos y procesamiento de la información

La predicción adecuada del arrastre de sedimentos tiene diversas aplicaciones en la ingeniería, tales como la explotación del río como cantera, estimación de erosión general, niveles de agua, etcétera, e indirectamente en el diseño de puentes.

El proceso de la información y los resultados obtenidos han sido abordados en la siguiente secuencia:

#### Formación de la coraza

- Evolución del diámetro del material de fondo en el tiempo.
- Comparación de la curva experimental con la obtenida del método de Gessler (Maza y García, 1996), el cual predice las condiciones finales de la curva de fondo o coraza.

#### Influencia de la coraza en el arrastre de sedimentos

- Evolución del diámetro del material arrastrado en el tiempo.
- Comparación de la curva experimental con la obtenida del método de Gessler (Maza y García, 1996), el cual predice las condiciones finales de la curva de arrastre.
- Cálculo del arrastre, utilizando los parámetros de la experimentación realizada, por métodos de gran difusión: Meyer-Peter y Müller, Einstein, Schoklitsch, y cálculo del arrastre utilizando los métodos antes mencionados, pero incorporándoles la variación del diámetro en el tiempo obtenido experimentalmente, y, finalmente, comparando estos resultados con las curvas experimentales.
- Estimación de un diámetro de las curvas granulométricas originales que, al aplicarlo a los métodos de cálculo del arrastre, permitan obtener resultados que se ajusten a los resultados experimentales.

#### Parámetros de los experimentos realizados

Los experimentos fueron realizados con los siguientes parámetros: diámetro de 24.3 mm, con caudal de 250 l/s y pendiente variable de 0.5, 0.9 y 2%; diámetro de 16.65 mm, con caudales de 200 y 250 l/s, pendiente de 0.9%, caudal de 160 l/s y pendiente de 1.2%; diámetro de 10.21 mm, con caudales de 120 y 160 l/s, con pendiente de 1.2%; caudal de 200 l/s y pendiente de 0.5% (cuadro 1).

**Cuadro 1.** Variación del diámetro  $D_{50}$  del material de fondo en el tiempo.

Tiempo horas	$D_{50} = 10.21 \text{ mm}$ $\sigma_g = 2.02$			$D_{50} = 16.65 \text{ mm}$ $\sigma_g = 2.05$			$D_{50} = 24.30 \text{ mm}$ $\sigma_g = 2.25$		
	Q = 120 l/s i = 1.2%	Q = 160 l/s i = 1.2%	Q = 200 l/s i = 0.5%	Q = 160 l/s i = 1.2%	Q = 200 l/s i = 0.9%	Q = 250 l/s i = 0.9%	Q = 250 l/s i = 0.5%	Q = 250 l/s i = 0.9%	Q = 250 l/s i = 2%
0	10.21	10.21	10.21	16.65	16.65	16.65	24.30	24.30	24.30
1	11.54		12.51		18.69	19.72	30.42	24.60	
1.5		12.40						26.60	29.44
2		12.30	13.06	18.30				28.10	34.67
3	12.76	12.60	13.45		21.56		34.47	29.90	38.08
5	13.07	12.50	13.58	19.24	22.07	20.84	34.52	30.30	38.00
8	13.06	12.50		19.30		20.97		30.40	
10	13.08	12.55	13.60	19.20	22.10	20.97	34.48	30.40	38.10

Resultados obtenidos en cuanto a la evolución de la coraza

En el cuadro 1 e ilustración 2 se presentan los resultados de los ensayos efectuados y se muestra la variación del diámetro  $D_{50}$  en función del tiempo. Tal como se observa, se han realizado ensayos para tres curvas granulométricas, combinándolos con caudales y variando la pendiente del canal de experimentación.

Analizando los resultados, luego de unas horas de ensayo se verifica la formación de la coraza, engrosándose la curva granulométrica hasta alcanzar valores constantes para unas determinadas condiciones de flujo y geométricas. En todos los casos, esto se logró después de cinco horas de ensayo. Por otro lado, debido a que en ningún caso se presentó una disminución del diámetro, se afirma que no se produjo la rotura de la coraza.

Análisis comparativo de los resultados experimentales de la coraza con los obtenidos al aplicar el método de Gessler (Maza y García, 1996)

Se compara la curva granulométrica de la coraza experimental al final del proceso con la curva obtenida

al aplicar el método de Gessler, el cual predice las condiciones finales de la curva granulométrica acorazada.

Este método es de gran difusión científica, por lo que se le seleccionó para realizar las comparaciones con los resultados experimentales.

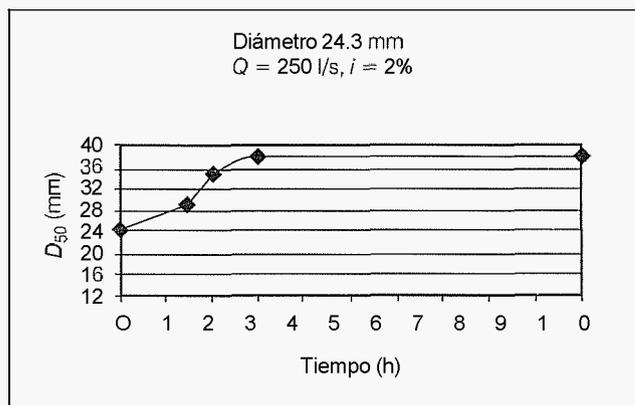
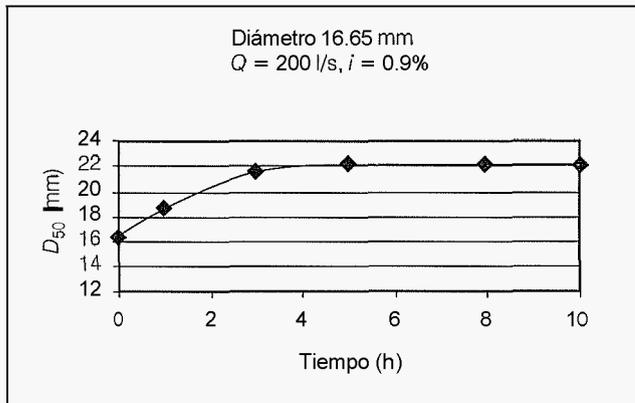
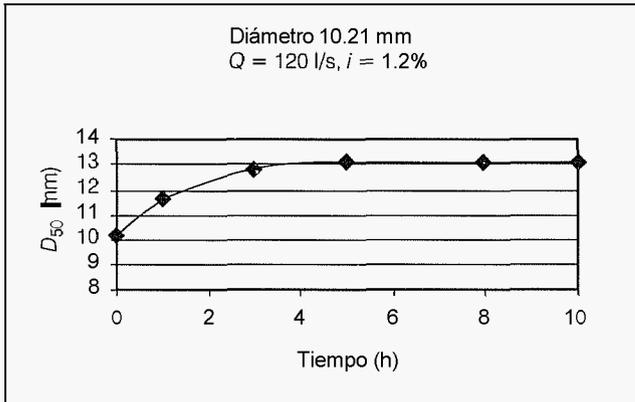
Gessler considera la idea de que existe un esfuerzo de corte máximo resistente a un material no cohesivo de granulometría extendida, por lo que presentó un método para estimarlo y, a la vez, conocer la variación del diámetro medio del acorazado con la tensión crítica del flujo. Se basa en separar en clases la curva granulométrica del material característico del fondo. Los porcentajes de separación,  $\Delta P_0$ , van a depender de la forma de la curva granulométrica, pero se recomienda considerarlos de 10%, luego se procede a la elección del diámetro representativo y el esfuerzo cortante máximo de cada clase. A continuación se estima el esfuerzo cortante medio producido por el flujo con la fórmula de Meyer-Peter y Müller.

El método supone una distribución normal de la variable aleatoria  $\tau_c/\tau_0$ , considerando que  $\mu=1$  y  $\sigma=0.57$ ; con base en esto se calcula la probabilidad de no excedencia,  $q$ , que va a corresponder a la probabilidad

**Cuadro 2.** Comparación de diámetros de fondo de resultados experimentales y de Gessler.

	$D_{50} = 10.21 \text{ mm}$			$D_{50} = 16.65 \text{ mm}$			$D_{50} = 24.3 \text{ mm}$		
	Q=120 l/s i = 1.2%	Q=160 l/s i = 1.2%	Q=200 l/s i = 0.5%	Q=160 l/s i = 1.2%	Q=200 l/s i = 0.9%	Q=250 l/s i = 0.9%	Q=250 l/s i = 0.5%	Q=250 l/s i = 0.9%	Q=250 l/s i = 2%
<b>Experimental</b>	13.08	12.55	13.58	19.30	22.07	20.97	34.47	30.40	38.10
<b>Gessler</b>	14.54	14.72	13.83	22.81	22.55	22.87	29.22	29.80	41.24

**Ilustración 2. Variación del diámetro  $D_{50}$  en el tiempo para diferentes caudales y pendientes.**



de que las partículas de la clase  $i$  no sean arrastradas y formen parte de la coraza. El proceso de cálculo continúa con la frecuencia del material original que permanece formando la coraza.

De los resultados obtenidos mostrados en el cuadro 2 se puede afirmar que aplicando el método de Gessler se obtienen, para los caudales menores, curvas granulométricas más gruesas que las experimentales; esta variación es, aproximadamente, de 1 a 2 mm; expresado en porcentaje es del 9 al 10% respecto del valor de coraza esperada; para caudales mayores, las curvas experimentales son más gruesas. En la ilustración 3 se muestran las curvas granulométricas de algunos de los valores tabulados, la situación mostrada es cuando el proceso está en equilibrio y la coraza ya se formó completamente para el caudal, pendiente y granulometría correspondientes.

Resultados y análisis referentes a la influencia del acorazamiento en el arrastre de fondo

Evolución del diámetro del material arrastrado en el tiempo

Se presenta la variación del  $D_{50}$  del material arrastrado para los diferentes ensayos realizados en esta investigación (cuadro 3), donde se puede apreciar que el material arrastrado tiene una tendencia a hacerse más fino hasta llegar al extremo de que ya no exista arrastre.

Comparación de resultados de la curva experimental con la obtenida al aplicar el método de Gessler

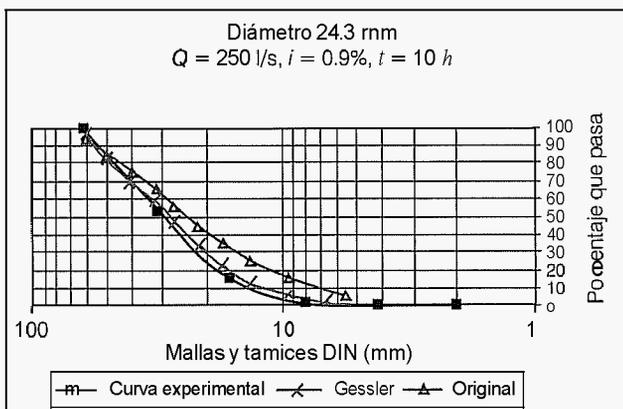
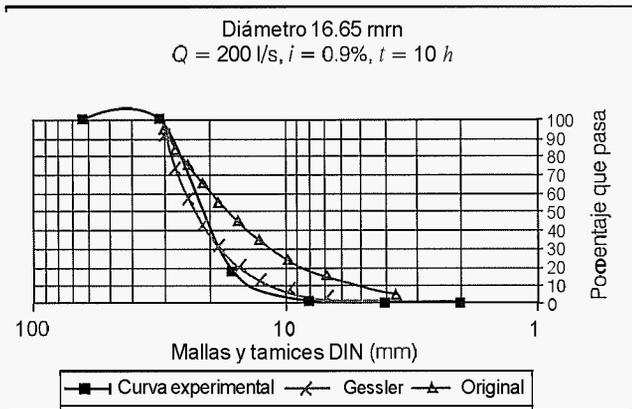
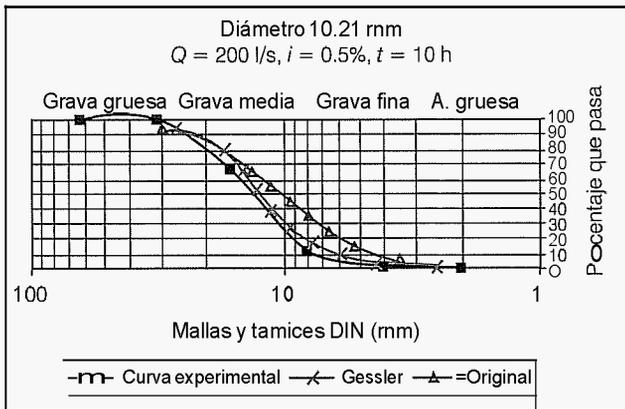
En la ilustración 4 figuran tres curvas, una de ellas es la curva del material inicial que cubría el canal de investigación; una segunda representa la curva del arrastre experimental al final del proceso, esta curva es obtenida mediante la acumulación de las muestras sacadas para distintos intervalos de tiempo, y la tercera curva es obtenida aplicando el método de Gessler.

Comparando los resultados experimentales con los obtenidos por el método de Gessler concluimos que este método arroja valores de curvas granulométricas más finas. Esto se debe a que Gessler, en sus ensayos, no incorporó material sólido al flujo.

Comparación de volúmenes obtenidos de los resultados experimentales

Se comparan los resultados experimentales con los cálculos obtenidos con fórmulas que no consideran el acorazamiento (diámetro constante) y con los resultados obtenidos con las mismas fórmulas, pero ingresándoles la variación del diámetro en el tiempo; es decir, considerando acorazamiento. Las fórmulas que se han utilizado para realizar las comparaciones son las

**Ilustración 3. Comparación de curva experimental con método de Gessler para diferentes parámetros.**



de fondo como constante e igual al inicial, por lo que los volúmenes acumulados se sitúan en una recta creciente y sin límite de arrastre en el tiempo. Sin embargo, disponiendo de la variación del diámetro ( $D$ ) en el tiempo, se han introducido estos valores en las fórmulas, a fin de simular que se produce acorazamiento. Como resultado de esto se obtienen curvas que se acercan más a la curva experimental, aunque no llegan a coincidir. Entonces se concluye que las fórmulas mejoran sus valores predictivos al incorporarles la variación del diámetro en el tiempo. El cuadro 4 presenta resultados de los ensayos realizados y la ilustración 5 detalla uno de ellos.

Estimación de diámetros representativos de la curva granulométrica original

Al aplicar estos diámetros representativos a las fórmulas de Meyer-Peter y Müller (1948), Einstein (1942) y Schoklitsch (1914), que no consideran acorazamiento, permiten obtener volúmenes similares arrastrados, considerando el acorazamiento.

Teniendo los valores de arrastre experimental que consideran acorazamiento, se ha buscado un diámetro de la curva granulométrica original para cada uno de los métodos que permita obtener semejantes valores de arrastre hasta el momento de la formación completa de la coraza (cuadro 5 e ilustración 6).

Los diámetros representativos de los distintos métodos sin considerar el acorazamiento son:

- Método de Einstein:  $D_{50}$  del material original.
- Método general de Schoklitsch:  $D_{40}$  del material original.
- Método de Meyer-Peter y Müller:  $D_{medio}$  del material original.

Aplicando la metodología descrita, los diámetros representativos planteados en esta investigación son:

- Método de Einstein:  $D_{71}$  del material original.
- Método general de Schoklitsch:  $D_{52}$  del material original.
- Método de Meyer-Peter y Müller:  $D_{67}$  del material original.

### Conclusiones y recomendaciones

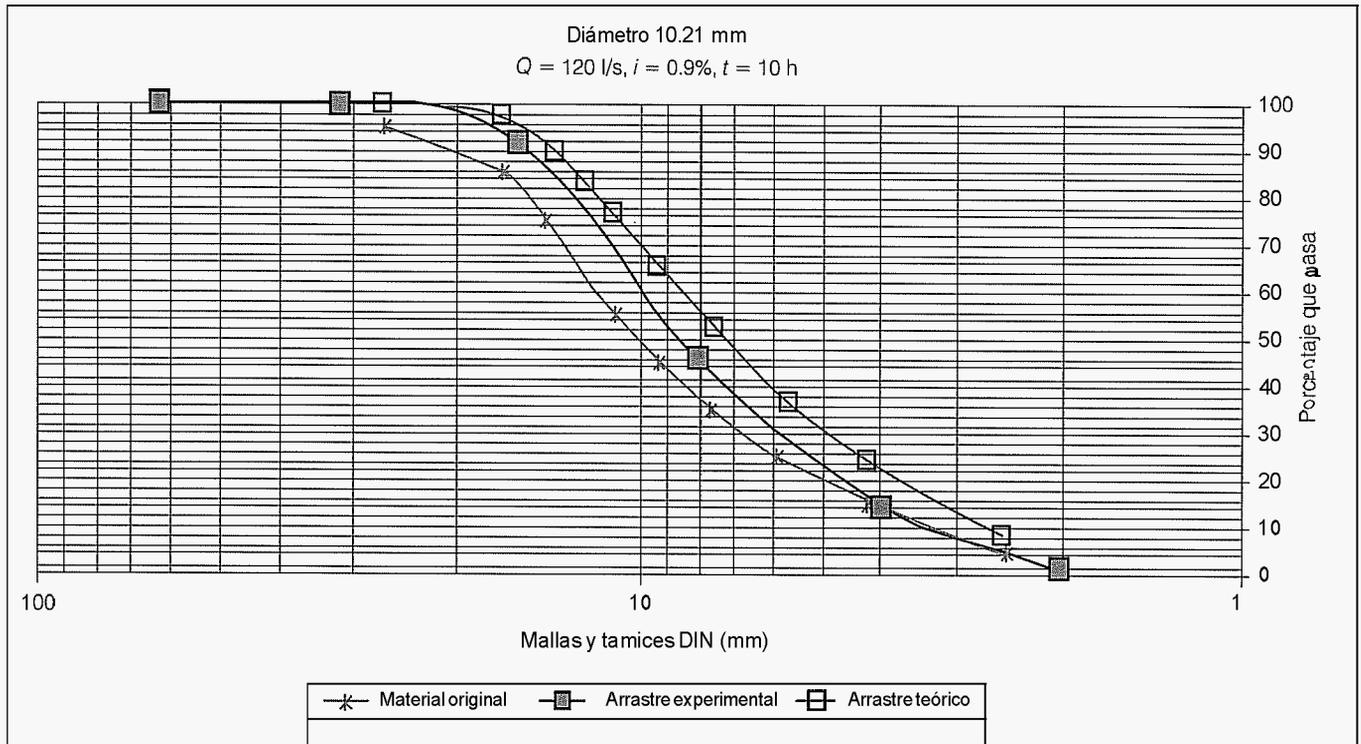
Analizando los resultados podemos observar:

- Luego de unas horas de ensayo se verifica la formación de la coraza, llegando a un máximo diámetro para unas determinadas condiciones de flujo y pendiente.

de Meyer-Peter, Einstein y Schoklitsch, debido a su gran difusión científica.

Como característica general, las fórmulas están planteadas de tal manera que consideran al diámetro

Ilustración 4 Comparación de la curva experimental con la obtenida por el método de Gessler.



Cuadro 3. Variación del diámetro  $D_{50}$  del material de arrastre en el tiempo.

Tiempo (h)	Diámetro 10.21 mm			Diámetro 16.65 mm		Diámetro 24.30 mm
	Q = 120 l/s i = 0.9%	Q = 160 l/s i = 1.2%	Q = 250 l/s i = 0.5%	Q = 160 l/s i = 1.2%	Q = 250 l/s i = 0.9%	Q = 250 l/s i = 1.2%
0.33	10.14	10.2	10.2	16.15	16.1	24.3
0.66	9.95				15.22	
1	9.82	10.06		14.19	14.58	
1.5	9.37		9.84		14.22	
2	9.1		9.81	13.18		
3	8.97	9.99	9.69		14.19	
4				13.11		
5	8.9	9.88			14.13	18.89
6			9.6			
7				12.73		
8	8.78	9.74			14.06	17.86
10	8.78	9.74	9.6	12.73	14.06	17.86
Final del proceso	8.78	9.74	9.6	12.73	14.06	17.86
Gessler	7.26	8.49	7.19	11.34	11.53	13.45

- En general, se observa que, después de cinco horas de ensayo, en todos los casos se ha logrado la mayor variación del diámetro, el cual prácticamente se mantiene para el tiempo restante.
- Debido a que en ningún caso se presentó disminución del diámetro, se puede afirmar que el rango de los ensayos no produjo la rotura de la coraza.
- De los resultados obtenidos podemos afirmar que,

**Cuadro 4. Comparación de resultados experimentales con cálculos teóricos, diámetro constante y diámetros engrosándose en el tiempo.**

Diámetro (mm)	Caudal (l/s)	Pendiente (%)	Tiempo (h)	Experim. (m <sup>3</sup> )	Con acorazamiento			Sin acorazamiento		
					Einstein (m <sup>3</sup> )	Mét. gen (m <sup>3</sup> )	Meyer (m <sup>3</sup> )	Einstein (m <sup>3</sup> )	Mét. gen. (m <sup>3</sup> )	Meyer (m <sup>3</sup> )
10.21	160	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
			0.333	0.046	0.21	0.27	0.62	0.21	0.27	0.61
			0.666	0.0268	0.42	0.54	1.23	0.42	0.54	1.22
			1	0.0416	0.62	0.83	1.56	0.63	0.82	1.85
			1.5	0.0527	0.93	1.26	2.27	0.94	1.22	2.77
			2	0.0611	1.24	1.68	3.74	1.26	1.63	3.69
			3	0.759	1.81	2.50	5.56	1.89	2.45	5.54
			5	0.981	2.51	3.67	7.55	3.15	4.10	9.24
			8	1.147	3.57	5.42	10.53	5.03	6.53	14.78
			10	1.147	4.13	6.35	11.83	6.29	8.166	18.47
10.21	120	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0
			0.333	0.009	0.025	0.038	-0.037			
			0.666	0.028	0.034	0.038	0.037			
			1	0.046	0.043	0.038	0.037			
			1.5	0.065	0.055	0.038	0.037			
			2	0.083	0.068	0.038	0.037			
			3	0.102	0.093	0.038	0.037			
			5	0.116	0.144	0.038	0.037			
			8	0.139	0.220	0.038	0.037			
			10	0.139	0.270	0.038	0.037	0.742	1.138	1.123
10.21	120	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
			0.333	0.019	0.090	0.149	0.279			
			0.666	0.019	0.175	0.270	0.473			
			1	0.028	0.259	0.392	0.668			
			1.5	0.042	0.365	0.558	1.012			
			2	0.042	0.472	0.702	1.333			
			3	0.130	0.688	0.989	1.974			
			5	0.130	1.120	1.563	3.256			
			8	0.139	1.528	1.991	4.004			
			10	0.139	1.800	2.276	4.503	2.701	4.476	8.374
16.65	200	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
			0.333	0.000	0.050	0.090	0.188			
			0.666	0.000	0.100	0.180	0.376			
			1	0.000	0.150	0.270	0.564			
			1.5	0.000	0.179	0.270	0.589			
			2	0.019	0.203	0.270	0.589			
			3	0.019	0.249	0.270	0.590			
			5	0.025	0.341	0.270	0.591			
			8	0.048	0.443	0.270	0.591			
			10	0.048	0.511	0.270	0.591	1.500	2.701	5.641

aplicando el método de Gessler, se obtienen, para los caudales menores, curvas granulométricas más gruesas que las experimentales; esta variación es de aproximadamente de 1 a 2 mm; expresado en porcentaje es del 9 al 10% respecto del valor de coraza esperada, mientras que para caudales mayores las curvas experimentales son más gruesas.

- Las fórmulas mejoran sus valores predictivos del arrastre si se les incorpora la variación del diámetro

( $D_{50}$ ) en el tiempo, de tal manera de simular que sí se considera acorazamiento.

- Para calcular el arrastre por las fórmulas de Einstein, Schoklitsch y Meyer-Peter y Müller, se recomienda utilizar los diámetros  $D_{50}$ ,  $D_{52}$  y  $D_{67}$ , respectivamente.

Recibido: 06/08/2003  
Aprobado: 25/02/2004

Ilustración 5. Se comparan resultados experimentales teóricos calculados con diámetro constante y teóricos calculados con diámetros engrosándose en el tiempo.

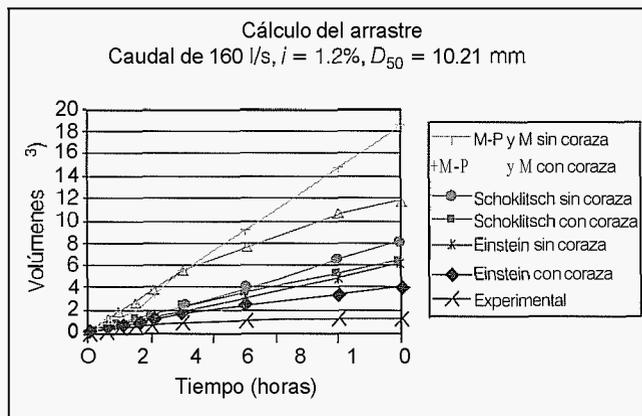
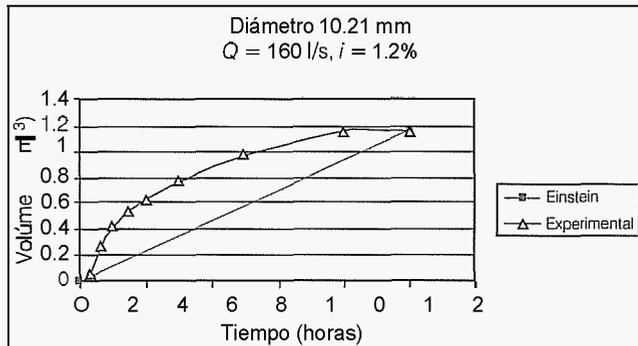


Ilustración 6. Volumen experimental semejante al volumen calculado por las fórmulas, pero con nuevo diámetro representativo.



Cuadro 5. Estimación de un diámetro representativo para obtener semejanza en volúmenes experimentales y calculados.

$D_{50}$ original	$Q$ (l/s)	$j$ (%)	Einstein		Schoklitsch mét. general		Meyer-Peter y Müller	
			Diám. (mm)	% a usar	Diám. (mm)	% a usar	Diám. (mm)	% a usar
10.21	120	0.9	13.22	67.64	9.26	44.43	11.88	59.78
10.21	120	1.2	16.86	84.58	11.86	59.70	14.63	75.63
10.21	160	1.2	14.98	77.05	12.76	64.95	16.44	82.88
10.21	250	0.5			9.10	43.47	11.12	55.34
16.65	160	1.2	21.50	66.32				
16.65	200	0.9	19.73	60.36				
16.65	200	1.2	26.43	82.92	15.42	45.68	19.53	59.69
16.65	250	0.9	20.13	61.72				
24.3	250	1.2	30.44	63.17				
24.3	250	1.5	36.06	70.09	21.24			
<b>D final de la curva granulométrica</b>			<b><math>D_{71}</math></b>			<b><math>D_{52}</math></b>		<b><math>D_{67}</math></b>

## Referencias

- AYALA, L. Fundamentos de hidráulica y mecánica fluvial. Santiago de Chile: Terceras Jornadas de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, septiembre de 1994.
- AYALA, L., CAMPOS, J. Transporte incipiente en flujos macrorugosos. Tesis del Centro de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1990.
- AYALA, L., LÓPEZ, E.A. Transporte generalizado de sedimento graduado en condiciones macrorugosos. Tesis del Centro de Recursos Hidráulicos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 1993.
- BAKKE, P., BASDEKAS, P., DAWDY, D. y KLINGEMAN, P. Calibrated parker-kliingeman model for gravel transport. Journal of hydraulic engineering, ASCE. Vol. 125, núm. 6, 1999, pp. 657-660.
- BEREZOWSKY, M. y JIMÉNEZ, A. Método simplificado para calcular el proceso de acorazamiento en cauces. Series del Instituto de Ingeniería. Núm. 548. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, UNAM, 1992.
- EINSTEIN, H.A. The bed load *unction* for sediment transport in open channel flows. Technical Bulletin 1086. Washington D.C.: US Department of Agriculture, 1950.
- GARCÍA, M. y MAZA, J.A. Inicio de movimiento y acorazamiento. Capítulo 8. Manual de ingeniería de ríos. Series del Instituto de Ingeniería. Núm. 592. México, D.F.: UNAM, 1997.
- HOLLY, F.M. Jr. y KARIM, M.F. Simulation of Missouri river bed degradation. Journal of hydraulic engineering, ASCE. Vol. 112, núm. 6, 1986, pp. 497-517.

- HOLLY, F.M. Jr. y RAHUEL, J.L. New numerical/physical framework for mobile-bed modeling. *Journal of hydraulic research*. Vol. 28, núm. 4, 1990.
- MCSICS, L. *Hydraulic models*. Fort Collins, EUA: Water Resources Publications, 1975.
- JAIN, S. Armor or pavement. *Journal of hydraulic engineering*. ASCE. Vol. 116, núm. 3, 1990, pp. 436-440.
- LEE, H. y ODGAARD, J. Simulation of bed armoring in alluvial channels. *Journal of hydraulic engineering*. ASCE. Vol. 112, núm. 9, 1986, pp. 794-801.
- LLORET, C. Transporte sólido incipiente en *granulometrías extendidas*. Santiago de Chile: XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, octubre de 1994.
- MARTIN-VIDE, J.P. *Ingeniería fluvial*. Barcelona: Ediciones Universidad Politécnica de Catalunya, 1997.
- MAZA, J.A. y GARCÍA, M. Transporte de Sedimentos. Capítulo 10. *Manual de ingeniería de ríos*. Series del Instituto de Ingeniería, No. 584. México, D.F.: UNAM, 1996.
- PARKER, G. y SUTHERLAND, A.J. Fluvial armor. *Journal of hydraulic research*. Vol. 28, núm. 5, 1990.
- SHEN, H.W. y LU, J. Development and prediction of bed armoring. *Journal of hydraulic engineering*. ASCE. Vol. 109, núm. 4, 1983, pp. 611-629.
- WÖRMAN. Incipient motion during static armoring. *Journal of hydraulic engineering*. ASCE. Vol. 118, núm. 3, 1992, pp. 496-501.

Abstract

REYES-SALAZAR, J. & DOMÍNGUEZ-COVARRUBIAS, B. *The armorng phenomenon and its influence on sediment drag. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XX, no. 7, January-March, 2005, pp. 29-41.*

*Armorng is a naturalphenomenon that appears when shear stress produced by the flow is less than the stress that the bigger grains of sediment can resist and bigger than the stress that the smallerparticles can resist. This produces, in the bottom of the stream, an increment in the number of non-dragged thicker particles that form a layer known as armor, with small-size material prevailing in the sediment transport. Drag in the bottorn of rivers is very influenced by the presence of this phenomenon, mainly due to the increment of the resistant stress and the median diameter of the particles. This is a sufficient motive to discard direct application of sediment drag methods. The main purpose of this article is a revision of the state of the art, then to present the results of experimental research that consist in the development in time of the phenomenon and its influence in the transport of sediment. Also, some modifications to the most widely diffused formulas are presented in order to improve their results.*

*Keywords: armor, sediment drag, fluvial.*

*Dirección institucional de los autores:*

*Ing. Jorge Demetrio Reyes-Salazar*

*Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería por la Pontificia Universidad Católica de Chile.*

*Profesor Ordinario Asociado.*

*Universidad de Piura,*

*Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria,*

*Facultad de Ingeniería,*

*Av. Ramón Múgica 131, Urb. San Eduardo, Piura, Perú,*

*Apartado Postal 353,*

*teléfono y fax: 51 73 304 308,*

*jreyes@udep.edu.pe*

*Dr. Bernardo Domínguez-Covarrubias*

*Profesor Titular.*

*Universidad Católica de Chile,*

*Instituto de Ingeniería Hidráulica y Ambiental,*

*teléfono y fax: 56 2354 4242,*

*bdomingu@ing.puc.cl*