

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

CARACTERIZACION GLOBAL DEL FENOMENO DE LA DEPOSITACION
DE LOS SOLIDOS EN EL FLUJO SOLIDO LIQUIDO EN CANALES

BERNARDO DOMINGUEZ C. (1)

RAUL SOUYRIS B. (2)

FERNANDO HARAMBOUR P. (3)

RESUMEN

La determinación del inicio de la depositación de los sólidos en el flujo sólido líquido en canales, es un aspecto relevante en el diseño de las instalaciones de transporte hidráulico de sólidos. En este trabajo se realiza una caracterización global del fenómeno de la depositación de los sólidos, y se analiza la incidencia del pH de la mezcla y de la granulometría de los sólidos en dicho fenómeno a la luz de las últimas experiencias desarrolladas en Chile.

(1) Dr. Ing. Prof. Titular. Escuela de Ingeniería. Pontificia U. Católica de Chile.

(2) Ing. Civil de Minas. Jefe de Proyectos CIMM.

(3) Ing. Civil. Depto. de Ing. Mecánica. U. de Magallanes.

1. INTRODUCCION.

El flujo de mezclas sólido líquido de alta concentración en canales, ha sido usado como método de transporte de pulpas minerales en Chile y en otros países que presentan diferencias de cota importantes entre las zonas de extracción y las zonas de producción y/o depósito del material estéril.

Entre los aspectos relevantes en el diseño de instalaciones para el transporte de pulpas minerales, se encuentra la verificación del fenómeno de depositación de los sólidos; si ello ocurre, existe el riesgo de bloqueo y desborde de la canalización, con el consecuente entorpecimiento del sistema de transporte.

La modelación de este tipo de flujo bifásico, se puede realizar tanto en forma global como local. En los modelos globales se describe el comportamiento medio del flujo, en tanto que en los modelos locales se describe el comportamiento del flujo en cada punto de una sección transversal al escurrimiento. En el primer tipo de modelación, se introduce un parámetro relacionado con una característica media del flujo para identificar el inicio de la depositación de los sólidos. Sin embargo, aún no ha sido posible obtener una expresión general, que permita su cuantificación en términos de todas las variables que controlan el fenómeno (Reyes et al., 1988). En la modelación local, por su parte, existen trabajos que permiten representar para casos particulares el flujo sólido líquido en canales (Dominguez y Vega, 1988), pero aún no se establece un criterio que cuente con amplio respaldo para identificar el inicio de la depositación de los sólidos.

La información experimental acumulada a la fecha, ha permitido establecer que el inicio de la depositación de los sólidos depende de la densidad de la mezcla, de la densidad de los sólidos, del radio hidráulico del flujo, de la granulometría del material sólido y del pH de la mezcla. En este artículo, se analiza la influencia de la fracción gruesa de la curva granulométrica y la del pH de la mezcla en el fenómeno de depositación, a la luz de las últimas experiencias realizadas en Chile.

2. MODELACION GLOBAL.

2.1. ANTECEDENTES EXISTENTES.

En la modelación global del flujo sólido líquido en canales, ha sido usual utilizar como parámetro hidráulico para caracterizar el inicio de la depositación de los sólidos, a la Velocidad Límite de Depósito (V_d). Ella puede definirse como la velocidad media máxima del flujo, para la cual se observa la formación de un lecho fijo de partículas sólidas en el escurrimiento.

Entre los investigadores que han estudiado dicho fenómeno en canales, es posible señalar, entre otros, a: González (1976), Errázuriz (1985), Domínguez et al. (1986), Vega (1988) y Reyes et al. (1988).

González (1976), adaptó la fórmula propuesta por Durand (1953) para calcular la velocidad límite de depósito en tuberías, con el objeto de obtener una expresión aplicable en canales. En la expresión desarrollada se reconoce que la velocidad límite de depósito depende de la densidad de los sólidos, de la densidad de la fase líquida, de la altura normal del escurrimiento, de la concentración volumétrica de la mezcla y del diámetro de las partículas sólidas.

Errázuriz (1985), encontró que la fórmula propuesta por González no se ajusta satisfactoriamente a los datos obtenidos experimentalmente. Ello lo condujo a introducirle modificaciones relacionadas con el efecto de los finos en la suspensión de las partículas gruesas y con la altura que estas deben recorrer para depositarse.

Dominguez et al. (1986), efectuaron un análisis dimensional del fenómeno, considerando como variables independientes explicativas del mismo a: la masa específica aparente de los sólidos ($D_s - D_m$), el diámetro característico de las partículas gruesas (d_{85}), la aceleración de gravedad (g), el radio hidráulico del escurrimiento (R), la viscosidad de la mezcla (μ_m) y la tensión tangencial crítica en el fondo (T_c). Luego de determinar los parámetros adimensionales que caracterizan el fenómeno, suponen que la tensión tangencial crítica en el fondo es proporcional a la masa

específica de la mezcla y al cuadrado de la velocidad media del flujo y además, desprecian el efecto de la viscosidad en el fenómeno, considerando que es de menor importancia que el de las otras variables involucradas. Finalmente, en base a un gran número de mediciones experimentales, obtienen la siguiente expresión para calcular la velocidad límite de depósito:

$$V_d = 1.83316(BqR(D_s/D_m - 1))^{0.5} (d_{85}/4R)^{0.15813} \quad (1)$$

Vega (1988), estudió experimentalmente el efecto del pH de la mezcla en la deposición de los sólidos. Las experiencias desarrolladas, utilizando relaves de cobre, mostraron que un aumento en el pH ocasiona un aumento tanto en la viscosidad de la mezcla como en la velocidad límite de depósito. Basándose en este hecho, postula que el efecto del pH en la deposición de los sólidos, puede ser modelado al incorporar la viscosidad de la pulpa en el cálculo de la velocidad límite de depósito. En base a los resultados experimentales obtenidos, desarrolla la siguiente expresión para calcular dicha velocidad:

$$V_d = 1.83316(BqR(D_s/D_m - 1))^{0.5} (d_{85}/4R)^{0.15813} 1.2 (3100/Re)^3 \quad (2)$$

$$Re = R(qR)^{0.5}/\nu_m \quad (3)$$

Reyes et al. (1988), estudiaron experimentalmente el mecanismo de depósito y embanque del flujo sólido líquido en canales. El análisis de los resultados obtenidos, particularmente aquellos que tienen relación con el efecto de la velocidad media del flujo en la segregación de las partículas caracterizadas por el diámetro d_{99} , los conduce a proponer un mecanismo de embanque. En dicho mecanismo, las partículas gruesas, caracterizadas por el diámetro d_{99} , actuarían como depósito semilla en el fenómeno de embanque del canal.

2.2. FORMULACION ADIMENSIONAL DEL FENOMENO.

En base a la evidencia experimental más reciente, puede reformularse el análisis dimensional efectuado por Domínguez et al. (1986), incluyendo, ahora, además de las variables explicativas introducidas por dichos investigadores, el pH de la mezcla y el diámetro característico de la fracción más gruesa de la curva granulométrica (d_{99}).

Al adimensionalizar las variables recién señaladas, se obtienen los siguientes 5 parámetros:

$$\pi_1 = T_o / ((D_s - D_m) q d_{85}) \quad (4)$$

$$\pi_2 = R / d_{85} \quad (5)$$

$$\pi_3 = d_{99} / d_{85} \quad (6)$$

$$\pi_4 = \nu_m / (d_{85} (q d_{85})^{0.5}) \quad (7)$$

$$\pi_5 = \text{pH} \quad (8)$$

Finalmente, considerando que el esfuerzo tangencial crítico es proporcional a la masa específica de la mezcla y al cuadrado de la velocidad media del flujo (Domínguez et al., 1986), se obtiene la siguiente relación funcional para calcular la velocidad límite de depósito:

$$V_d = (q d_{85} (D_s/D_m - 1))^{0.5} F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (9)$$

De acuerdo a los antecedentes preliminares, el parámetro π_2 , debe jugar un papel importante en el inicio de la deposición de los sólidos, pues relaciona el tamaño de las partículas que se postula actúan como semilla en dicho fenómeno, con el tamaño característico de las partículas gruesas de la curva granulométrica. Por otra parte, aún no está claramente establecida la factibilidad de considerar que el efecto del pH (parámetro π_5) en la deposición de los sólidos, pueda ser totalmente incorporado en el parámetro π_4 , por lo tanto es necesario incorporar ambos

parámetros en la modelación global del fenómeno.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DEL PH Y DE LA GRANULOMETRIA EN EL FENOMENO DEL DEPOSITO.

Con el objeto de ilustrar la influencia del pH y de la granulometría del material sólido, en el comportamiento del flujo sólido líquido de alta concentración en canales, se desarrolló en la Planta Piloto para flujo sólido líquido, que posee el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, un programa de experimentación consistente en el estudio del comportamiento hidráulico de dos materiales de granulometría diferente, para pH básico, neutro y ácido.

El canal de experimentación utilizado tiene una longitud aproximada de 18 m., es de forma rectangular con un ancho basal de 0.557 m. y posee dos visores ubicados en una de las paredes laterales y en el fondo del canal, respectivamente, con el objeto de detectar cuando se produce el depósito de los sólidos.

Las características de los materiales ensayados se muestran en la Tabla 1. En ella se aprecia que la diferencia más importante entre los dos materiales ensayados corresponde al diámetro d99.

TABLA 1

MATERIAL	Ds	d50	d85	d99
---	Kg/m ³	mm	mm	mm
1	2730	0.030	0.242	1.122
2	2760	0.031	0.322	0.590

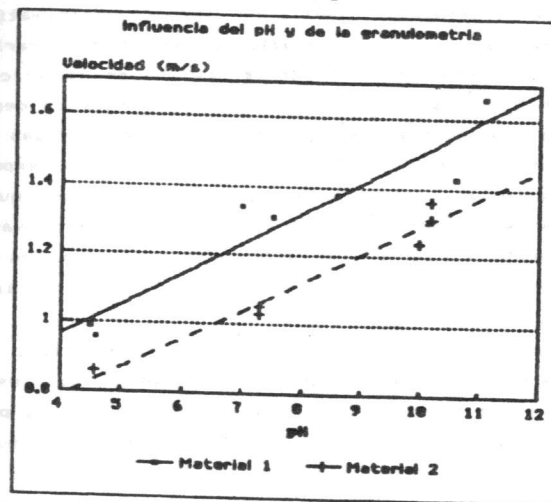
Por otra parte, los resultados obtenidos al medir la viscosidad de la mezcla para ambos materiales, usando un viscosímetro rotatorio, para una concentración en peso igual al 39 %, se muestran en la Tabla 2. En ella se aprecia que la viscosidad de la pulpa aumenta al aumentar el pH.

TABLA 2

pH	Viscosidad Aparente
--	Pa s
4	0.00329
6	0.00422
8	0.00475
10	0.00507
12	0.00611

Las experiencias desarrolladas mostraron que en el flujo de relaves de cobre de alta concentración en canales, la velocidad límite de depósito aumenta al aumentar el pH. Además, se encontró que, para un mismo pH, el material 1 presenta velocidades límite de depósito superiores a las del material 2. Estos resultados se ilustran en la Figura 1.

FIGURA 1



4. ANALISIS DE RESULTADOS.

El desarrollo del trabajo experimental, permite confirmar lo observado por Vega (1988), en el sentido que el pH de la mezcla sólido líquido influye en forma importante en la velocidad límite de depósito. Por otra parte, los resultados obtenidos con respecto a la influencia de la fracción más gruesa de la curva granulométrica, muestran que dicha fracción (caracterizada por el diámetro d_{99}) juega un rol importante en el fenómeno de la depositación de los sólidos.

Los resultados obtenidos permiten, además, justificar la incorporación del parámetro adimensional μ_3 en la modelación global del fenómeno. Pero, por otra parte, no permiten justificar ni rechazar, en forma categórica, la hipótesis según la cual el efecto del pH en la velocidad límite de depósito puede ser incorporado a través de su efecto sobre la viscosidad de la pulpa.

Con el objeto de decidir acerca de la conveniencia de incorporar la viscosidad de la mezcla en una expresión para calcular la velocidad límite de depósito, se calculó con la fórmula propuesta por Irarrázaval (1987), la viscosidad cinemática de la mezcla ensayada por CIMM (1982), encontrándose variaciones, ocasionadas por cambios en la concentración de la mezcla, del orden de un 450 %, aún cuando la velocidad límite de depósito no experimentó variaciones similares a la observadas en las experiencias de Vega (1988) o a las observadas en las experiencias recién desarrolladas. Cabe señalar, por otra parte, que en las experiencias efectuadas por Vega (1988), se midieron variaciones de la viscosidad cinemática, ocasionadas por variaciones en el pH, del orden de un 350 %, en tanto que en las experiencias recién efectuadas, dicha variación fue del orden de un 50 %.

De acuerdo a lo expresado en el párrafo anterior, no parece conveniente modelar la variación de la velocidad límite de depósito con el pH, a través de su influencia en la viscosidad; por cuanto una variación en la viscosidad cinemática de la mezcla, puede estar asociada con variaciones significativas o menores de la velocidad límite de depósito, dependiendo de que dicha variación sea causada

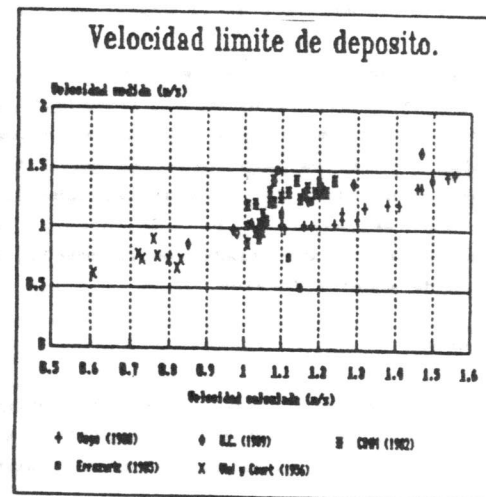
por una modificación en el pH o en la concentración de la mezcla.

Al ajustar la ecuación (9) a los resultados experimentales, luego de eliminar el parámetro μ_3 , por considerar que su efecto es de menor importancia que el de las otras variables, se obtiene la siguiente expresión para calcular la velocidad límite de depósito:

$$V_d = 0.8(Bgd_{85}(D_s/D_m - 1))^{0.5} (4R/d_{85})^{0.234} (d_{99}/d_{85})^{0.278} \mu^{0.279} \quad (10)$$

En la Fig. 2, se comparan gráficamente los valores de la velocidad límite de depósito medidos experimentalmente por Vial y Court (1956), CIMM (1982), Errázuriz (1985), Vega (1988) y en las experiencias recién efectuadas (U.C., 1989) con los calculados mediante el empleo de la ecuación (10).

FIGURA 2.



En caso de no disponer de información acerca del pH de la mezcla, se recomienda el empleo de la siguiente expresión para calcular la velocidad límite de depósito:

$$V_d = 0.6505(Bgd85(Ds/Dm - 1))^{0.5} (4R/d85)^{0.342} (d99/d85)^{0.363} \quad (11)$$

Finalmente, en caso de no disponer de información acerca del pH de la mezcla ni acerca del diámetro d_{99} , se recomienda utilizar la fórmula desarrollada por Domínguez et al. (1986).

5. CONCLUSIONES.

Las experiencias desarrolladas en Chile, con el objeto de investigar el comportamiento del flujo sólido líquido en canales, muestran, por una parte, que la velocidad límite de depósito permite caracterizar el fenómeno de la depositación de los sólidos y, por otra parte, que dicho parámetro depende, entre otras variables, del pH de la mezcla y de la granulometría del material sólido.

Cabe señalar, además, que es necesario continuar con los estudios experimentales del flujo sólido líquido en canales, con el objeto de conocer con mayor profundidad la influencia de las variables señaladas en el párrafo anterior, en el fenómeno de la depositación de los sólidos. Por otra parte, dada la complejidad del fenómeno que se estudia, es conveniente destacar que difícilmente puede ser caracterizado completamente, sin recurrir a la utilización de modelos locales.

6. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo contó con el financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), a través del Proyecto 89 - 0526. Los autores desean dejar constancia de su agradecimiento.

7. REFERENCIAS.

1. CIMM (1982). "Estudio del canal de relaves planta sulfuros". Informe Final del Proyecto P-171, División Mineralúrgica, Centro de Investigación Minera y Metalúrgica.
2. DOMINGUEZ, B.; DOMINGUEZ, E. y ERRAZURIZ, P.P. (1986). "Velocidad límite de depósito en el flujo de mezclas sólido líquido en canales". Apuntes de Ingeniería 23, Pontificia Universidad Católica de Chile, 123 - 132.
3. DOMINGUEZ, B. y VEGA, M. (1988). "Modelación del flujo sólido líquido en escurrimientos a superficie libre". Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba.
4. DURAND, R. (1953). "Basic relationship of the transport of solids in pipes". Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convention, Minnesota.
5. ERRAZURIZ, P.P. (1985). "Estudio experimental del flujo sólido líquido a alta concentración en canales". Tesis de Mag. en Cs. de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Stgo.
6. GONZALEZ, P. (1976). "Estudio Teórico-Experimental de una Canaleta de Relaves". Memoria de Título, Depto. de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile. Stgo.
7. IRARRAZAVAL, M. (1987). "Estudio experimental del comportamiento reológico de relaves de cobre mediante el uso de viscosímetros capilar y rotatorio". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
8. REYES, J.; SOUYRIS, R. y JOFRE, J. (1988). "Análisis de un desarenador continuo para el control operacional de situaciones de transporte crítico en canales". Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. 39 Convención. Punta Arenas.
9. VEGA, M. (1988). "Modelación del flujo sólido líquido en canales". Tesis para optar al grado de Magister en Cs. de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Stgo.
10. VIAL, R. y COURT, F. (1956). "Estudio Hidráulico Experimental del Escurrimiento de Pulpas de Azufre". Tesis de para optar al título de Ingeniero. U. de Chile. Stgo.

B. NOTACION.

- Vd : Velocidad límite de depósito (m/s).
g : Aceleración de gravedad (m/s²).
dB5 : Diámetro característico del material sólido (m).
d99 : Diámetro característico del material sólido (m).
R : Radio hidráulico del flujo (m).
Ds : Masa específica del material sólido (Kg/m³).
Dm : Masa específica de la mezcla sólido líquido (Kg/m³).
pH : pH de la mezcla.
 μ m : Viscosidad de la mezcla (Pa \cdot seg).
 ν m : Viscosidad cinemática de la mezcla (m²/s).
To : Tensión tangencial en el fondo (Pa).

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

ESTABLECIMIENTO DE FLUJO ESTACIONARIO EN DUCTOS EN SERIE

Mario Letelier S.

Arturo Velásquez S.

Eduardo Orellana N.

RESUMEN

Se analiza el fenómeno de establecimiento de flujo laminar, paralelo e incompresible en un sistema de dos tubos en serie. El análisis se realiza a través de las ecuaciones unidimensionales de movimiento para cada tramo de tubería, las cuales quedan acopladas por la presión en la unión de los dos tubos. Se determinan caudal, presión en la unión, y tiempo de establecimiento para diversos valores de la razón de radios de los ductos. En contraste a la conducta que se tiene en una cañería de diámetro único, se encuentra que en un sistema en serie la presión no es constante en el tiempo aún cuando las presiones en los extremos del sistema sean constantes.

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile.