

BERNARDO DOMINGUEZ C., Dr. Ing. (1)

ANDRES LOPEZ A., Mag. Ing. (2)

MODELACION DEL TRANSPORTE HIDRAULICO DE CARBON EN CANALES

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la investigación experimental y teórica del transporte hidráulico de carbón en canales, caracterizando la concentración máxima y la viscosidad de la pulpa .

La modelación del flujo sólido líquido se aborda desde un enfoque global y local. En la modelación global se utiliza un coeficiente de rugosidad de Manning modificado por la presencia de los sólidos, para representar la pérdida de carga. En la modelación local se propone un modelo para la distribución de velocidades y la distribución de concentraciones en una sección transversal del flujo, considerando los fenómenos que se producen debido a la presencia de los sólidos.

De los resultados obtenidos en esta investigación se pueden obtener parámetros importantes que sirven para dar mayor confiabilidad al diseño de obras para el transporte hidráulico de carbón.

(1) Dpto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile
(2) ICC-CONIC Ingenieros Consultores Ltda.

I. INTRODUCCION

Uno de los costos más importantes en los procesos de extracción de carbón es el transporte del material, lo que ha motivado a estudiar métodos más económicos y eficientes, entre los que se encuentra el transporte hidráulico de los sólidos.

Con la intención de contar con criterios de diseño confiables para las obras utilizadas con este fin, en esta investigación se aborda teórica y experimentalmente el transporte hidráulico de carbón en canales, relacionando su comportamiento por medio de modelos globales y locales.

Se propone una metodología para determinar el valor de la Concentración Máxima, en base a la distribución granulométrica de los sólidos y una relación para la viscosidad de la pulpa.

En base a las experiencias realizadas en flujo sólido-líquido, para el enfoque global se estudia la pérdida de carga, entregando una relación para el coeficiente de rugosidad de Manning modificado. Para la modelación local se propone un modelo para la distribución de velocidades en la vertical central y en la horizontal, utilizando la teoría de Prandtl-Von Karman, adecuada al escurrimiento sólido líquido. Para la distribución de concentraciones se propone una relación en base a un equilibrio de fuerzas que actúan sobre los sólidos transportados.

II.- EXPERIENCIAS PARA ESTUDIAR EL TRANSPORTE HIDRAULICO DE CARBON EN CANALES

2.1 Caracterización de los Sólidos y de la Pulpa de Carbón

El carbón utilizado en las experiencias proviene de la mina Pecket, ubicada en Magallanes (Chile), de la empresa COCAR S.A., con una masa específica de los sólidos $\rho_s = 1385$ (Kg/m³) y diámetros de las partículas menores que 25 mm.

- Concentración Máxima

Para determinar la Concentración Máxima es necesario considerar los tres aspectos siguientes: a) Cálculo de C_m para empaquetamientos aleatorios de partículas uniformes, b) Variación de C_m con el diámetro de las partículas, y c) Variación de C_m con la distribución granulométrica. En base a estos criterios se determinó experimentalmente una relación para C_m por fracción granulométrica que es:

$$C_m = 0.4875 + 4.431E-4 \log_{10} (d_k) \quad (1)$$

con:

d_k : diámetro característico de la fracción granulométrica k

Conocidos los valores de C_m por fracción granulométrica se utiliza una forma similar a la señalada por Stovall et al. (1986), en la que se determina cual de las fracciones se encuentra en C_m , que corresponde al mínimo valor de concentración (χ_i) calculado a partir de la ecuación:

$$\chi_i = C_{mi} + (1 - C_{mi}) (C_{v1} + C_{v2} + \dots + C_{v(i-1)}) + C_{v(i+1)} + C_{v(i+2)} \dots + C_{vn} \quad (2)$$

- Viscosidad

Se estudió experimentalmente el comportamiento reológico de la pulpa en un viscosímetro rotatorio, modificando la concentración volumétrica y la temperatura de las muestras, tomando la relación planteada por Irarrázabal (1987) para relaves de cobre, se obtuvo:

$$\mu_m = \mu_o e^{\left[\frac{3.977 C_v}{1 - 1.330 C_v} \right]} \quad (3)$$

donde:

μ_m : viscosidad de la mezcla

μ_o : viscosidad del agua

C_v : concentración volumétrica

2.2 Metodología Experimental

En el estudio del comportamiento del flujo sólido-líquido no es posible generalizar o extrapolar resultados, por lo que para cada tipo de material transportado es necesario contar con datos experimentales que sirvan para relacionar los parámetros en la modelación global y para calibrar el modelo en la modelación local. Por esta razón se realizaron 21 experiencias en la Planta Piloto del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica, en un canal rectangular de 0.56 m de ancho y 20 m de largo. Un resumen de las principales características de estas experiencias se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1 Resumen de experiencias realizadas

Experiencia	Q(m ³ /s)	l(%)	C _p (%)	h _n (m)	d ₉₉ (mm)	d ₅₀ (mm)
1.1	0.095	0.9	7.25	0.14	24.71	4.43
1.2	0.085	0.9	7.25	0.131	24.03	2.63
1.3	0.076	0.9	7.65	0.076	16.09	1.19
2.1	0.101	0.9	12.00	0.144	15.20	1.65
2.2	0.093	0.9	11.76	0.141	17.28	1.42
2.3	0.050	0.9	10.04	0.077	17.54	1.47
3.1	0.104	0.9	14.80	0.163	18.44	2.96
4.1	0.101	0.9	21.38	0.145	17.92	1.77
4.2	0.064	0.9	23.51	0.110	17.92	1.77
5.1	0.105	0.9	22.25	0.157	17.50	2.51
5.2	0.077	0.9	22.68	0.130	21.13	3.61
6.1	0.100	1.9	26.91	0.122	15.44	1.93
6.2	0.078	1.9	24.19	0.105	15.44	1.93
7.1	0.103	1.9	18.21	0.110	16.15	2.36
8.1	0.101	1.9	23.68	0.100	15.44	1.62
8.2	0.089	1.9	23.68	0.085	15.44	1.62
9.1	0.100	1.9	12.78	0.088	14.26	1.01
9.2	0.900	1.9	13.12	0.087	14.26	1.01
9.3	0.051	1.9	16.74	0.065	14.26	1.01
10.1	0.100	1.9	9.89	0.090	15.93	1.20
10.2	0.054	1.9	9.54	0.070	15.93	1.20

III. MODELACION DEL FLUJO SOLIDO LIQUIDO EN CANALES

Existen fundamentalmente dos formas de abordar la modelación del flujo sólido líquido: desde un punto de vista global y desde un punto de vista local.

En el análisis global se estudian las características medias del escurrimiento, en tanto que el análisis local estudia los fenómenos que ocurren entre las partículas y el líquido.

3.1 Modelación Global para Describir el Flujo Sólido Líquido en Canales

Con los antecedentes presentados por Errázuriz (1985) para evaluar la pérdida de carga en flujo sólido líquido por medio de la expresión de Manning, se utiliza una relación para el coeficiente de rugosidad modificado por la presencia de los sólidos, que es:

$$n = \frac{R_h^{1/6}}{10.1 - 17.7 \log \left(\frac{k_s}{4R_h} + 21.25 \left(\frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right)} \quad (4)$$

Se comprobó experimentalmente, para el caso del carbón, que el valor de la aspereza equivalente (k_s) es posible evaluarla como d₆₅.

Utilizando la ecuación 4 se encontraron las alturas teóricas del flujo, que fueron graficadas en comparación con las alturas experimentales (ver Figura 1), donde se aprecia una buena correlación entre ellas.

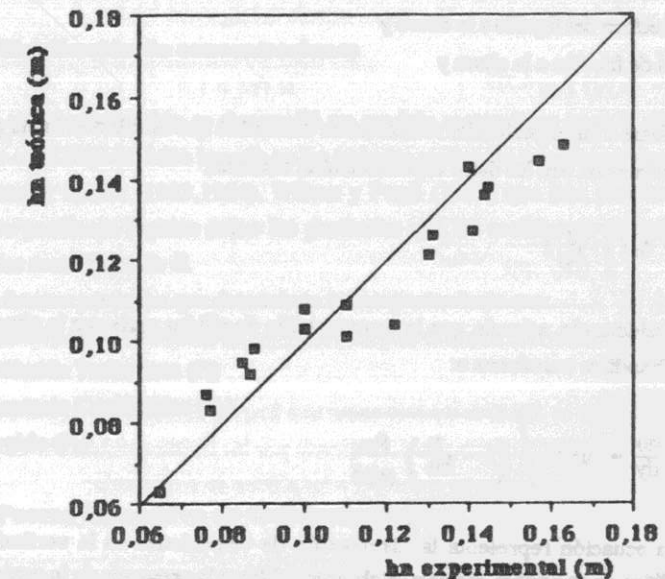


Figura 1 Comparación entre altura normal experimental y teórica

3.2 Modelación Local para Describir el Flujo Sólido Líquido en Canales

a) Distribución de velocidades

1) Distribución de velocidades en la vertical central

En el desarrollo teórico realizado por Prandtl se presenta una hipótesis para determinar la distribución de velocidades de un flujo turbulento en la vertical central, asumiendo que las fluctuaciones turbulentas están confinadas en un cierto límite definida por la longitud $\lambda = ky$, por lo que:

$$\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \lambda \frac{du}{dy} = u^*(y) \quad (5)$$

donde:

- τ : esfuerzo de corte a la altura y
- ρ : masa específica del líquido a la altura y
- $u^*(y)$: velocidad de fricción a la altura y

En base a las experiencias realizadas se determinó que la relación lineal para τ cumple una mejor aproximación con los datos experimentales, entonces:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{hm}\right) \quad (6)$$

Considerando, además, que la concentración de sólidos varía con la altura, la ecuación planteada por Prandtl se transforma a:

$$ky \frac{du}{dy} = u^* \sqrt{\left(1 - \frac{y}{hm}\right) \frac{\rho_m}{\rho(y)}} \quad (7)$$

Esta ecuación representa la distribución de velocidades en la vertical central, y su resolución analítica no es posible, fundamentalmente debido a la presencia de la razón $\rho_m/\rho(y)$, que impide la integración.

En base a los datos experimentales se encontró que el valor de la constante universal de Von-Karman k disminuye de 0.4 a 0.18, reduciéndose el nivel de turbulencia por la presencia de los sólidos.

ii) Distribución de velocidades en la horizontal

Para la distribución de velocidades en la horizontal se propone un factor de corrección (CVH) similar al de Domínguez et al.(1988), para considerar el efecto que tienen las paredes laterales de la canalización. Este factor de corrección es:

$$CVH = 1 - (1 - H) \left(\frac{y}{hm}\right)^3 \quad (8)$$

con:

$$H = \frac{5.5 + 5.75 \log\left(\frac{x_p}{k_s}\right)}{5.5 + 5.75 \log\left(\frac{0.5b}{k_s}\right)}$$

donde:

- x_p : distancia a la pared más cercana
- b : ancho del canal
- k_s : aspereza equivalente, evaluada como d_{65}

b) Distribución de concentraciones

En esta investigación se desarrolló un modelo matemático para la distribución de concentraciones en el flujo bifásico basado en los trabajos realizados por Harambour (1990), Hsu et al.(1989), Roco y Shook (1983,1984), Wilson y Pugh (1988) que han planteado que en el escurrimiento se producen fuerzas sobre las partículas que las mantienen en suspensión o las arrastran hacia las zonas bajas de él.

Las fuerzas presentes que determinan su comportamiento son:

- i) Fuerza Dispersiva de Colisiones (F_d)
- ii) Fuerza de Difusión Turbulenta (F_t)
- iii) Fuerza de contacto Coulómbico (F_c)
- iv) Peso Sumergido (P_g)

1) Fuerza Dispersiva de Colisiones (F_d)

El esfuerzo de corte debido a las colisiones entre partículas sólidas queda asociado a un fuerza normal por fracción granulométrica (F_{dk}):

$$F_{dk} = C_k \frac{g \rho_s l}{\text{tg} \theta} \left(F\left(\frac{C}{C_m}\right) - (h_m - y) \frac{d}{dy} F\left(\frac{C}{C_m}\right) \right) \quad (9)$$

donde:

C_k : concentración volumétrica de la fracción k

ρ_s : masa específica de los sólidos

l : pendiente del canal

$F\left(\frac{C}{C_m}\right)$: función empírica para relacionar las difusividades líquida y sólida

θ : ángulo de fricción dinámico determinado experimentalmente para cada tipo de partículas

Harambour (1990) propuso una relación para $F\left(\frac{C}{C_m}\right)$ que calibrada para las experiencias con carbón se obtiene:

$$F\left(\frac{C}{C_m}\right) = \frac{11.2 \beta l^{-0.368}}{\left(1 - \frac{C}{C_m}\right)^{0.5}} \quad (10)$$

donde:

β : es coeficiente de corrección que se calcula del siguiente modo:

$$\beta = 1 \quad \text{si } Fr_d < 1.7$$

$$\beta = 0.797 Fr_d^{-0.223} \quad \text{si } Fr_d \geq 1.7$$

Fr_d corresponde al número de Froude modificado, introducido en esa investigación:

$$Fr_d = \frac{\rho_l u^*{}^2}{g (\rho_s - \rho_l)} \sqrt{\frac{d_{99}}{d_{85}}}$$

ii) Fuerza de Difusión Turbulenta (F_t)

Este término es difícil de derivar como una fuerza. La hipótesis fundamental es que las fuerzas inherentes a la difusión turbulenta, originada por las fluctuaciones turbulentas de las fases sólida y líquida, son responsables de mantener a los sólidos en suspensión:

$$F_{tk} = -\rho_l g (s-1) \frac{\epsilon_s}{\omega_s} \frac{dC_k}{dy} \quad (11)$$

donde:

ϵ_s : coeficiente de difusión turbulento

ω_s : velocidad de sedimentación de las partículas

iii) Fuerza de Contacto Coulómbico (F_c)

La Fuerza de Contacto Coulómbico fue introducida por Roco y Shook (1983) y corresponde a la fuerza que las partículas transmiten a las capas inferiores a través del contacto directo con los otros sólidos. Este valor es proporcional al peso total de las partículas que se encuentran en una determinada capa. El valor de la Fuerza de Contacto Coulómbico queda, para cada fracción granulométrica:

$$F_{ck} = C_{sok} (s-1) g \rho_l C_k \quad (12)$$

Con la relación para el coeficiente de carga soportada C_{sok} por Hsu et al. (1989), se propone una expresión experimental definida como:

$$C_{sok} = \left(\frac{0.05}{Fr_k}\right)^2 \quad (13)$$

donde:

Fr_k : Número de Froude modificado definido como:

$$Fr_k = \frac{u^* \rho_l}{g d_k (\rho_s - \rho_l)}$$

iv) Peso sumergido (P_s)

El último componente considerado para desarrollar el modelo de distribución de concentraciones corresponde al peso sumergido que, por unidad de volumen para cada fracción granulométrica, es:

$$P_{sk} = C_k g (\rho_s - \rho_l) \quad (14)$$

Teniendo definidas las fuerzas que actúan sobre cada fracción granulométrica se plantea el equilibrio entre las ecuaciones, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$-\frac{\epsilon_s}{\omega_s} \frac{dC_k}{dy} + C_k \frac{g \rho_s l}{\text{tg} \theta (\rho_s - \rho_l)} \left(F\left(\frac{C}{C_m}\right) - (h_m - y) \frac{d}{dy} F\left(\frac{C}{C_m}\right) \right) - C_k (1 + C_{sok}) = 0 \quad (15)$$

3.3 Análisis y Comparación de Resultados

Con las ecuaciones planteadas para la distribución de velocidades y la distribución de concentraciones, se desarrolló una herramienta computacional que las resuelve en forma conjunta, utilizando métodos numéricos, permitiendo conocer tanto las variables locales como medias.

En la Figura 2 se muestra una comparación gráfica entre los resultados obtenidos con el modelo para la distribución de velocidades y las mediciones de velocidad de la experiencia 7.1 con $C_p=18.21\%$, $Q=0.103 \text{ m}^3/\text{s}$. Se incluye, además, los resultados que se obtienen con el modelo utilizado por Vega (1988) y Harambour (1991) en pulpas de relave de cobre, que presenta diferencias importantes en la zona más baja del escurrimiento, donde se presentan los mayores esfuerzos de corte en el sentido del flujo, y en la zonas altas al disminuir el esfuerzo de corte.

En la Figura 3 se han graficado los resultados obtenidos con el modelo de distribución de concentraciones y las mediciones efectuadas en la experiencia 7.1. Se observa que el modelo presenta una forma más continua que los valores experimentales, debido a que estos últimos tienen asociados errores relacionados a las limitaciones del instrumental utilizado.

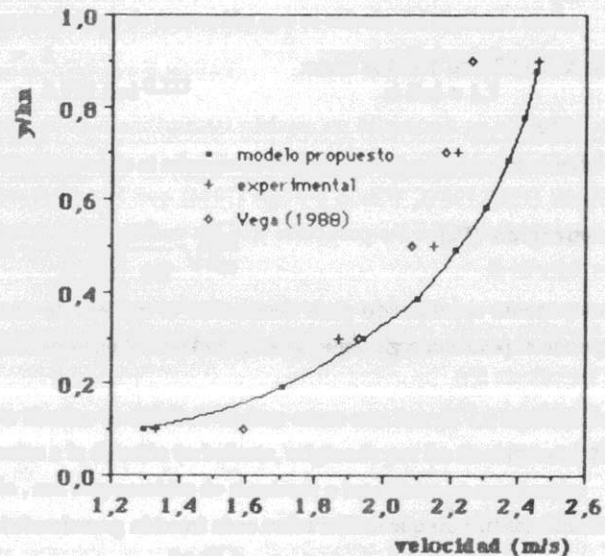


Figura 2 Comparación velocidad vertical central experimental y modelos, Experiencia 7.1, $C_p = 18.21\%$

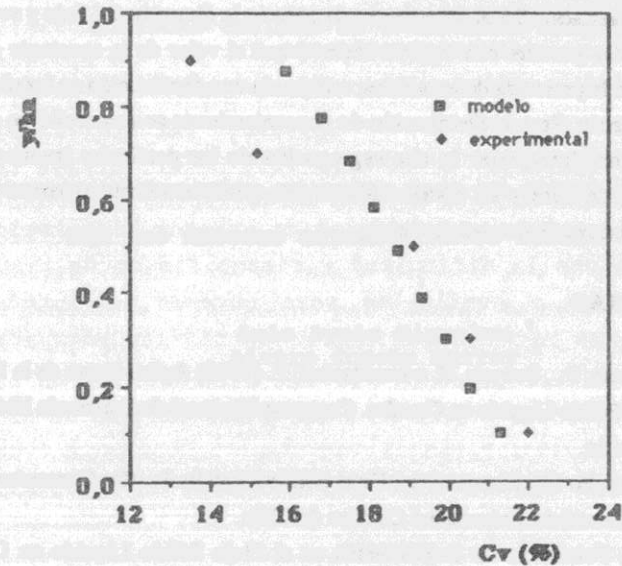


Figura 3 Comparación concentración vertical central experimental y modelo, Experiencia 7.1

IV. CONCLUSIONES

Para la concentración máxima (C_m) se desarrolló una metodología que supone que una de las fracciones granulométricas se encuentra C_m , y las demás se ubican en los huecos de ésta o sólo aumentan el valor de la concentración.

Se obtuvo una relación para la viscosidad en función de la concentración en volumen y la viscosidad del agua. Se observó un comportamiento newtoniano hasta $C_p=45\%$, que corresponde al rango de experimentación para el flujo sólido-líquido.

En la modelación global del flujo se entrega una fórmula para el coeficiente de rugosidad de Manning (n), en función de las características del escurrimiento, de la pulpa y del canal, que entrega resultados que se relacionan adecuadamente a los obtenidos experimentalmente. Se observó que la rugosidad equivalente (k_s) puede ser evaluada como d_{65} de la curva granulométrica. Además, se ha incorporado la relación para la viscosidad de la pulpa desarrollada en este trabajo.

Se ha desarrollado, en la caracterización local, un modelo para la distribución de velocidades y distribución de concentraciones en una sección del flujo. Para la distribución de

velocidades se propone la variación lineal del esfuerzo de corte en la dirección del flujo y evaluar la aspereza equivalente de las paredes con d_{65} . Se observó que el valor de la constante de Von Karman (k) disminuye con la presencia de los sólidos, reflejando una disminución en los niveles de turbulencia del escurrimiento. Para la distribución de concentraciones se desarrolló un modelo multifásico, adaptado para interpretar la alta segregación de las partículas transportadas, considerando el tamaño de ellas y su distribución. Tanto para la velocidad como para la concentración se obtuvieron resultados satisfactorios.

V. REFERENCIAS

- Domínguez, B., Errázuriz, P., Souyris, R. e Irrazábal, F. (1985) Aplicaciones de la Fórmula de Manning en el Flujo Sólido Líquido en Canales. Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Concepción.
- Errázuriz, P. (1985) Estudio Experimental del Flujo Sólido Líquido de Alta Concentración en canales. Tesis Magister Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Harambour, F. (1990) Fenómeno de Depositación en el Flujo Sólido Líquido en Canales: Modelos Globales y Locales. Tesis Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Hsu, F., Turlan, R., Ma, T-W. (1989) Flow of Noncolloidal Slurries in Pipelines. A.I.Ch.E. Journal, Vol. 35, Nº 3, 429-442.
- Irrazábal, M. (1987) Estudio Experimental del Comportamiento Reológico de Relaves de Cobre Mediante el Uso de Viscosímetros Capilar y Rotatorio. Tesis Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- López, A. (1991) Modelación del Transporte Hidráulico de Carbón en Canales. Tesis Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Roco, M., Shook, C. (1983) Modeling of Slurry Flow: The Effect of Particle Size. The Canadian Journal of Chemical Eng. Vol. 61, August.
- Roco, M., Shook, C. (1984) Computational Method for Coal Slurry Pipelines with Heterogeneous Size Distribution. Powder Technology, Vol. 39, 159-176.
- Wilson, K., Pugh, F. (1988) Dispersive-force Modelling of Turbulent Suspension in Heterogeneous Slurry Flow. The Canadian Journal of Chemical Eng., Vol. 66, 721-727.

FUNCION DE ARRASTRE DE FONDO PARA EL CAUCE CORDILLERANO DEL RIO MAPOCHO OBTENIDA EN UN MODELO FISICO

Luis Ayala Riquelme ¹
Alvaro Concha Murray ²

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos en un estudio en modelo físico de un tramo del cauce cordillerano del río Mapocho los cuales permiten definir una función de arrastre de fondo basada en el uso de una relación simple propuesta para sedimento uniforme de gran calibre.

Sobre la base de comparar las funciones adimensionales de arrastre para sedimentos graduado y uniforme, se concluye que en el caso de este cauce, para esfuerzos de corte adimensionales $T > 1,0$, asociados a diámetros menores que el tamaño D_{20} de la curva granulométrica del material integral del lecho, el cálculo del gasto sólido total puede basarse en el uso de la función de arrastre uniforme con fracciones granulométricas cualesquiera que cumplan con la condición $D > D_{20}$.

Se incluye también las curvas granulométricas del material de arrastre expresadas en función de T , lo que permite complementar el cálculo del gasto sólido total con la distribución de tamaños del material arrastrado.

1 Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

2 Ayudante de Investigación del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.