

Estudios en honor de
Francisco Javier Domínguez
AUCh, 5ª Serie, N° 8 (1985): 417-435

HIDRAULICA DE PULPAS DE RELAVES EN CONTORNOS CERRADOS*

ALFREDO EDWARDS VELASCO
con la colaboración de
ALFREDO CARRASCO MOLINA
Chile

1. INTRODUCCIÓN

En la minería, el transporte hidráulico de sólidos adquiere cada día mayor importancia. Es así como en Chile existen múltiples líneas de este tipo, tanto en presión como en acueducto, destinadas a conducir pulpas de concentrados de mineral, de relaves o de otra clase de sólidos, según sea el caso. A esto se debe el creciente interés que presenta el estudio teórico y experimental del fenómeno.

El presente informe no pretende hacer un estudio de los fundamentos teóricos del problema, sólo tiene por objeto entregar recomendaciones prácticas referentes a diseño hidráulico de tuberías de relave en presión, basándose en la experiencia que la firma posee en esta materia.

En general los valores que aquí se entregan tienen sólo la aproximación que se puede obtener de medidas de terreno. En efecto, las velocidades medidas se basan en aforos simples o cálculos indirectos a partir de cubicaciones de material colocado y de mediciones rápidas de concentración, y las mediciones de pérdidas de carga en general fueron estimadas

*Estudio realizado bajo la responsabilidad de la firma Ricardo Edwards G. Ingenieros Ltda. Santiago, mayo 1985.

en base a los valores de consumo de los equipos de bombeo. Por esta razón, las conclusiones que se entregan deben considerarse como una ayuda para un prediseño de obras de este tipo, o para diseño rápido de adecuaciones de obras durante la operación de un tranque de relaves.

2. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN TRANSPORTE HIDRÁULICO DE SÓLIDOS (T.H.S.)

El T.H.S. consiste, como su nombre lo indica, en conducir sólidos en emulsión en un fluido portante, el que generalmente es agua. El comportamiento de la mezcla será diferente, dependiendo de las características de concentración, densidad, granulometría, velocidad, turbulencia, y otros factores que ésta pueda presentar.

El fluido portante posee cierta capacidad de arrastre de sólidos. Por otro lado, las partículas tienden a sedimentar. Así, dependiendo de la magnitud de cada uno de estos efectos, será más o menos dificultoso el transporte hidráulico de la pulpa.

Los fenómenos más importantes de evaluar en el T.H.S., son la velocidad límite de depósito (V_1) y la pérdida de carga por unidad de longitud que presenta una conducción (J). Existen muchas maneras de definir la velocidad límite de depósito, pero para este estudio, que tiene sólo objetivos prácticos, ésta se define como aquella velocidad de flujo a la cual los sólidos gruesos permanecen detenidos por periodos importantes en el fondo de la tubería. El concepto de pérdida de carga por unidad de longitud es el mismo definido para flujos de agua pura.

Para este estudio interesa determinar la velocidad límite y las pérdidas de carga, basándose en variables fáciles de medir, como son la concentración de la pulpa, el diámetro d_{50} de las partículas, peso específico de los sólidos y velocidad del flujo, aparte de las características geométricas de la conducción. Esto constituye una simplificación importante para el análisis, pero facilita la aplicación práctica de las recomendaciones que se proponen.

3. BASES DEL ESTUDIO PROPUESTO

En la literatura existen distintos modelos para la evaluación de la pérdida de carga y la velocidad límite de depósito para escurrimiento de pulpas en presión. Sin embargo, la experiencia de distintos autores y de esta firma en particular, ha mostrado que la evaluación de la pérdida de carga mediante las fórmulas de la hidráulica clásica, como son las de Manning,

Colebrook & White, Hazen Williams y algunas acomodaciones a estas mismas fórmulas que plantean algunos autores, entrega una aproximación muy confiable para su estimación, siempre y cuando la velocidad del flujo sea superior a la límite de depósito. La experiencia de esta firma ha corroborado dichos fundamentos, y en este estudio se pretende dar a conocer los antecedentes disponibles y su interpretación.

A la vista de lo recién mencionado, se aprecia que la evaluación de la pérdida de carga no tendría mayor dificultad, siempre y cuando la velocidad límite de depósito haya sido bien estimada.

Para situaciones en que la velocidad de flujo es inferior a la límite de depósito, se considera que sólo participa en el escurrimiento una sección equivalente a la que daría la velocidad límite y la diferencia, correspondería a una sección de embanque. De este modo, la pérdida de carga aumentará para situaciones como éstas, por tres razones: aumento de la velocidad, incremento de la rugosidad de fondo y empeoramiento del radio hidráulico. Este tipo de situaciones puede llevar a una obstrucción total de la tubería, en caso de no existir energía suficiente para vencer la pérdida de carga.

Para la estimación de la velocidad límite de depósito se ha desarrollado una gran cantidad de modelos, los que en este estudio fueron analizados. De acuerdo a los rangos experimentales empleados por los respectivos investigadores y a una verificación con los antecedentes disponibles, los modelos que aparecen como más indicados para predecir velocidades límites de pulpas de relaves o de arenas de relaves en presión, son el de Durand, el de Wasp y el de Oroskar & Turian.

El modelo de Durand fue uno de los primeros métodos desarrollados. Pese a ser bastante utilizado, en general resulta demasiado conservador. El de Wasp corresponde a un mejoramiento del de Durand, y constituye una buena estimación para concentraciones volumétricas inferiores al 20%. Los dos modelos ya mencionados presentan el inconveniente de no tomar en cuenta el descenso de la velocidad límite para concentraciones mayores. Por esta razón, para concentraciones volumétricas superiores a un 30%, se recomienda hacer la evaluación de estos modelos manteniendo constante dicho valor.

El modelo de Oroskar & Turian posee una base teórica y experimental muy acabada, por lo que en general sus valores no se escapan de los reales para un amplio rango de las distintas variables involucradas en el transporte hidráulico de sólidos.

Además de los tres modelos mencionados, en este estudio se propone emplear un cuarto modelo, consistente en un ajuste al modelo de Wasp,

aplicable a concentraciones volumétricas mayores a un 18,7%, considerando la influencia de la concentración en la velocidad límite, variable en forma análoga a la del modelo de Oroskar & Turian. (En adelante este cuarto modelo se identificará como "modelo de Wasp modificado").

Para la evaluación de la pérdida de carga se emplearán las ecuaciones de Manning, de Colebrook & White y Colebrook & White modificada. Esta última relación consiste en aplicar un modelo reológico para la evaluación de la viscosidad de la pulpa, y de este modo recalcular el número de Reynold.

Las expresiones de los modelos de evaluación de pérdidas de carga y velocidades límites se indican a continuación:

a) *Evaluación de Pérdida de Carga*

+ Manning.

$$J = \left(\frac{v \cdot n}{R^{2/3}} \right)^2$$

donde:

$$n = \left(\frac{X_s \cdot ns^{3/2} + X_t \cdot nt^{3/2}}{X_s + X_t} \right)^{2/3} \quad (\text{rugosidad compuesta}).$$

en que ns se obtiene de una correlación análoga a la de Strikler (RI), calibrada de acuerdo a experiencias en conducciones con lechos embancados en Talabre (Div. Chuquicamata).

$$ns = 0,020 \cdot \left(\frac{d_{50}}{250} \right)^{1/6}$$

con d_{50} en micrones.

+ Colebrook & White.

$$J = \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g}$$

donde $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{E}{3,7 D} \right)$

$$E = \frac{E_t \cdot X_t + E_s \cdot X_s}{X_t + X_s} \text{ con } E_s = d_{50}$$

$$Re = \frac{V \cdot 4 \cdot R}{\nu}$$

+ Colebrook & White modificada:

La expresión es la misma, sólo varía la forma de cálculo de la viscosidad, la cual se propone evaluarla según se indica a continuación.

$$\frac{\nu m}{\nu} = \frac{1 + 2,3 \cdot Cv + 10,05 \cdot Cv^2 + 2,73 \times 10^{-3} \cdot \exp(16,6 \cdot Cv)}{1 + (S - 1) \cdot Cv} \text{ (Thomas)}$$

$$\frac{\nu m}{\nu} = 10 \quad \text{(Recomendación de R. Constantini para evaluación de pérdidas de carga en pulpas de relave en presión).}$$

El número de Reynold se calcula con νm en vez de ν .

b) Evaluación de Velocidades Límites

+ Durand.

$$V_L = F_{LD} \cdot (2 \cdot g \cdot (S - 1) \cdot D)^{1/2}$$

Donde F_{LD} según se indica en el gráfico adjunto (Figura 2).

+ Wasp.

$$V_L = F_{LW} \cdot (2 \cdot g \cdot (S - 1) \cdot d_{50})^{1/2} \cdot (D/d_{50})^{1/3}$$

$$\text{donde } \begin{array}{ll} F_{LW} = 3,33 \cdot Cv^{0,1977} & \text{para } Cv \leq 30\% \\ F_{LW} = 2,625 & \text{para } Cv > 30\% \end{array}$$

+ Oroskar & Turian.

$$\frac{V_L}{(g \cdot d_{50} \cdot (S-1))^{1/2}} = 1,85 \cdot Cv^{0,1536} \cdot (1-Cv)^{0,3564} \cdot \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{0,378}$$

$$\dots \cdot \left(\frac{D \cdot (g \cdot d_{50} \cdot (S-1))^{1/2}}{\gamma}\right)^{0,09} \cdot X^{0,30}$$

donde:

$$X = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{4 K^2}{\pi}\right) + \int_K^{\infty} \exp\left(-\frac{4 K^2}{\pi}\right) dK \right)$$

donde $K = \frac{W}{\sqrt{v}}$, y la integral que aparece en la expresión corresponde a la función error.

+ Wasp Modificacio.

Relación idéntica a la de Wasp, donde sólo varía la expresión para el cálculo de F_{LW} de acuerdo a lo que a continuación se indica.

$$F_{LW} = 3,33 \cdot Cv^{0,1977} \text{ para } Cv \leq 18,7\%$$

$$F_{LW} = 3,33 \cdot Cv^{0,1536} \cdot (1 - Cv)^{0,3564} \text{ para } Cv > 18,7\%$$

Nomenclatura utilizada:

Esquema idealizado de una situación cualquiera en T.H.S.

- J : pérdida de carga por unidad de longitud (en m de pulpa/ m lineal).
- D : diámetro interno de la tubería.
- A_e : sección de escurrimiento.
- A_s : sección de embalque.
- X_t : perímetro mojado de la tubería.
- X_s : perímetro mojado fondo embancado.

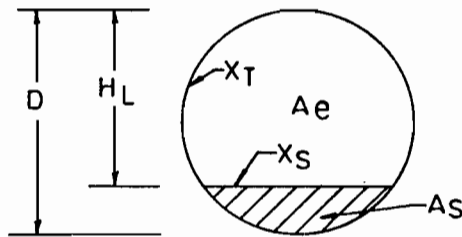


Figura 1

$$R = \frac{A_e}{X_s + X_t} : \text{radio hidráulico del escurrimiento.}$$

d_{50} : diámetro del tamiz que deja pasar un 50% del material.

CURVA PARA EVALUAR $F_{1,D}$ (DURAND)

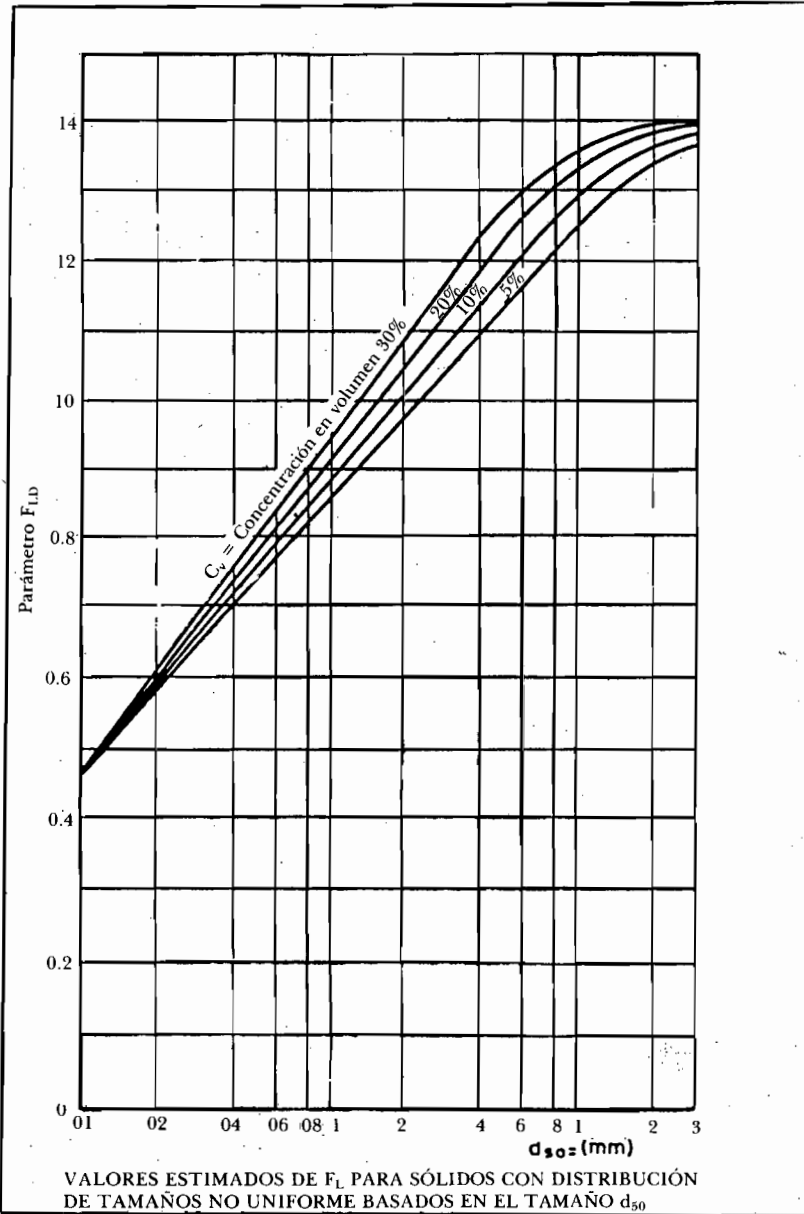


Figura 2

$V = \frac{Q}{A_e}$: velocidad real de escurrimiento.

$V_n = \frac{Q}{A_e + A_s}$: velocidad nominal de escurrimiento.

g : aceleración de gravedad.

E_t : aspereza equivalente de la tubería.

ν : viscosidad cinemática del fluido (agua).

C_v : concentración en volumen de la suspensión en tanto por uno
($C_v = C_p / (S \cdot (1 - C_p) + C_p)$).

ν_m : viscosidad cinemática de la pulpa

C_p : concentración en peso de la suspensión en tanto por uno
($C_p = S \cdot C_v / \rho_m$)

ρ_m : $1 + C_v \cdot (S - 1)$.

S : peso específico de los sólidos.

W : velocidad libre de sedimentación de la partícula d_{50} .

V_L : velocidad límite de depósito.

4. INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE TRANSPORTE HIDRÁULICO DE RELAVES

4.1. Transporte Hidráulico de Arenas

El transporte hidráulico de arenas de relave en tuberías es habitual en construcciones de tranques de relave. En efecto, la distribución de la fracción gruesa, que es la que forma el prisma resistente de la presa, se efectúa en general en tubería a lo largo del coronamiento del muro.

Pese a ser escasa la información existente, pudo seleccionarse algunos valores a partir de los cuales es posible deducir velocidades límites de depósito y pérdidas de carga.

a) *Tranque de relaves Talabre (División Chuquicamata - Codelco Chile / firma contratista SERVINCO-SEGEX)*

La distribución de arenas sobre los distintos muros del tranque, que fue diseñada y operada por la firma contratista, se efectúa en una tubería de polietileno de alta densidad (H.D.P.) de 200 mm, cuyo diámetro interno es de 187,6 mm.

Las arenas son conducidas a concentraciones que fluctúan generalmente entre 60 y 70%, a velocidades de entre 2,5 y 3,0 m/s con pérdidas de carga comprendidas entre 4,5 y 5%.

Las partículas conducidas presentan un diámetro d_{50} que fluctúa entre 210 y 250 micrones.

Se aprecian problemas en la conducción de la pulpa, cuando las velocidades de flujo bajan de 2,3 m/s en condiciones de granulometría gruesa ($d_{50} = 250$ micrones) y concentraciones bajas (60%).

b) *Tranque Pérez Caldera N° 2 (Compañía Minera Disputada de Las Condes S.A.)*

La distribución de arenas sobre el coronamiento del muro se realiza en una tubería de acero revestida interiormente en goma, cuyo diámetro interior es 144 mm.

La tubería no ha sufrido problemas operacionales desde su instalación. Al comienzo las velocidades en esta tubería fluctuaron entre 2,0 y 2,5 m/s, y en la actualidad éstas han aumentado a valores comprendidos entre 3,0 y 3,5 m/s.

Las arenas se conducen a concentraciones comprendidas entre 70 y 72%, y el diámetro d_{50} fluctúa entre 150 y 180 micrones.

Sólo se han podido estimar pérdidas de carga desde que se instalaron bombas para impulsar la pulpa de arena, obteniéndose valores que fluctúan entre 9 y 10%, para velocidades entre 3,25 y 3,45 m/s, respectivamente.

c) *Tranque de Relaves Piuquenes (División Andina - Codelco Chile)*

De acuerdo a la publicación de la referencia R2, complementada con datos adicionales, en el período 1972-1974 se utilizó una batería centralizada de ciclones, la cual alimentó una tubería de acero de 155 mm de diámetro interno, que se dispuso sobre el coronamiento del muro para distribuir arenas a una concentración media de un 70% con un diámetro d_{50} del orden de 125 micrones, a una velocidad nominal comprendida entre 1,3 y 1,5 m/s.

El esquema de cicloneo fue reemplazado en 1974 por diversas razones, entre las cuales se menciona la dificultad para transportar hidráulicamente las arenas a través de la tubería de 155 mm. A esto se suma el hecho que los consumos de energía de bombeo fueron mucho más altos que los esperados, lo que indica que la tubería habría operado con embanque de fondo.

4.2. Transporte Hidráulico de Relaves completos

a) Conducciones al Tranque Talabre (División Chuquicamata Codelco Chile / firma contratista *SERVINCO-SEGEX*)

Los relaves del mineral de Chuquicamata que se emplean en la construcción del tranque Talabre son conducidos a concentraciones que fluctúan entre 47 y 51%, y presentan un diámetro d_{50} entre 70 y 90 micrones. Estos son conducidos por una tubería de H.D.P. de 558,6 mm de diámetro interno, a velocidades comprendidas entre 1,9 y 2,1 m/s, con pérdidas de carga del orden de 6 o/oo para la velocidad nominal de operación que es de 2,05 m/s.

La distribución de los relaves para la construcción del tranque Talabre fue operada por la firma contratista (*SERVINCO-SEGEX*), asesorada por esta oficina. La distribución se lleva a cabo mediante tres tipos de tuberías de H.D.P., cuya operación se describe a continuación.

Una tubería de 422 mm de diámetro interno, operó adecuadamente a velocidades comprendidas entre 1,8 y 2,1 m/s, con pérdidas de carga entre 7 y 8 o/oo.

Otra tubería de 469 mm de diámetro interno, instalada a continuación de la anterior, operó a velocidades nominales¹ variables entre 1,45 y 1,7 m/s. Las concentraciones en la descarga no eran parejas, y las pérdidas de carga eran superiores a lo esperado para esas velocidades, alcanzando al 10 o/oo. Se estima que la línea habría operado con un embanque de fondo, el que se trasladaba en forma de ondas sedimentarias a menor velocidad que el resto de la pulpa, provocando las fluctuaciones de concentración ya mencionadas.

La tercera tubería de distribución de 516,8 mm de diámetro interno, operó a velocidades normales de 2,4 m/s, con pérdidas de carga de un 9 o/oo, operando sin problemas.

b) Tuberías de relaves de División Andina - Codelco Chile

La actual tubería de 18" de diámetro exterior, que conduce relaves desde el espesador hasta el tranque Los Leones, fue objeto de un estudio de velocidades y pérdidas de carga (R2). Mediante dos medidores de presión se obtuvo una pérdida de carga de 7,57 o/oo para una velocidad media de flujo de 1,78 m/s, sin detectarse fenómenos atribuibles a embanques.

¹Velocidad Nominal: caudal dividido por sección interior de la tubería.

Un dato adicional disponible, es que la antigua tubería de relaves de 14" de diámetro exterior, operó sin problemas, con velocidades comprendidas entre 1,60 y 2,4 m/s.

4.3. Interpretación de la Información Disponible

A continuación se presenta un cuadro con la recopilación de la información ya mencionada, en el cual se han interpretado algunos fenómenos.

La interpretación de los valores de velocidades límites, en general aparece en forma de cotas inferiores o superiores, sin explicitar el valor exacto, debido a que la información proviene de operaciones industriales, donde por razones obvias no es posible variar los parámetros a voluntad.

5. EVALUACIÓN TEÓRICA DE PÉRDIDAS DE CARGA Y VELOCIDADES LÍMITES DE DEPÓSITO, Y COMPARACIÓN CON MEDICIONES DISPONIBLES

5.1. Metodología de Procesamiento de la Información

Para el procesamiento de la información se propone emplear la siguiente metodología:

i) Se acepta que los valores de pérdida de carga cumplen las relaciones de Manning, Colebrook & White y Colebrook & White modificada y para cada caso se despeja el valor de la rugosidad (rugosidad de Manning para la ecuación de Manning, y aspereza equivalente en caso de la ecuación de Colebrook & White y Colebrook & White modificada).

El único conjunto de medidas a partir del cual es posible hacer alguna deducción, es el comprendido por las distintas tuberías de H.D.P. de Talabre que conducen relaves, de modo que esta información se considerará como base para este estudio.

ii) Se escoge el (o los) modelo(s) de pérdida de carga indicando su(s) rango(s) de aplicación y coeficientes de rugosidad o aspereza que procedería emplear según sea el caso.

iii) Para las tuberías que operan embancadas, deberá calcularse la velocidad real de escurrimiento, que en este caso corresponderá a la límite de depósito de la sección real de escurrimiento.

El procedimiento para la determinación de la velocidad real de escurrimiento es el siguiente:

- La pérdida de carga se conoce y es igual al valor medido J_0 .
- La pérdida de carga puede expresarse en función de la velocidad

TABLA I

CUADRO RESUMEN INFORMACIÓN DISPONIBLE

Diámetro tubería	Material tubería	Concentración en peso	Diámetro de partículas	Velocidad nominal de flujo	Velocidad real de flujo	Velocidad límite	Pérdida de carga (m. pulpa/m)	Observaciones
D		Cp %	d ₅₀ mcr	Vnf m/s	V m/s	V _L m/s	J o/oo	
187,6	H.D.P.	60	250			~ 2,3		
187,6	H.D.P.	65	230	2,5	2,5		45	
187,6	H.D.P.	65	230	3,0	3,0		55	
144,0	Acero rev. goma	70	180			< 2,0		
144,0	Acero rev. goma	70	165	3,25	3,25		90	
144,0	Acero rev. goma	70	165	3,45	3,45		100	
155,0	Acero	70	125			> 1,5		Tubería que opera embancada.
422,0	H.D.P.	52	90			< 1,8		
422,0	H.D.P.	48	80	1,8	1,8		7	
422,0	H.D.P.	48	80	2,1	2,1		8	
469,0	H.D.P.	48	80	1,6	1,784	> 1,8	10	Tubería que trabaja embancada.
419,0	H.D.P.	48	80			~ 1,784	10	Se estimó que la V de la fila anterior corresponde a D = 419
558,6	H.D.P.	48	80	2,05		~ 2,05	6	Tubería que opera a velocidad muy cercana a la límite de depósito.
438,15	Acero	45	37	1,767	1,767	< 1,767	7,46	
434,95	Acero	45	37	1,793	1,793	< 1,793	7,68	
339,75	Acero	45	37			< 1,65		
516,8	H.D.P.	48	80	2,4	2,4	< 2,4	9	

real de escurrimiento (v), del radio hidráulico real de escurrimiento (R) y de la rugosidad o aspereza compuesta de la sección (b).

$$J_o = J_o(v, R, b) \quad (1)$$

— Estas tres variables pueden dejarse en función de la sección real de escurrimiento, de acuerdo a lo que se indica a continuación:

$$v = Q/A_e \quad (2)$$

$$b = b(X_t, b_t, X_s, b_s) \quad (3)$$

$$R = \frac{A_e}{X_t + X_s} \quad (4)$$

donde:

- Q = caudal (conocido).
- A_e = sección real de escurrimiento.
- X_t = perímetro mojado tubería.
- b_t = aspereza o rugosidad tubería (conocida).
- X_s = perímetro mojado embanque.
- b_s = aspereza o rugosidad embanque (dependiente de la granulometría conocida).

Se tiene también que los perímetros mojados de la tubería y del embanque dependen sólo de la sección real de escurrimiento.

$$X_t = X_t(A_e) \quad (5)$$

$$X_s = X_s(A_e) \quad (6)$$

A partir de las seis ecuaciones enumeradas pueden obtenerse los valores de v , R , b , A_e , X_t , X_s .

La velocidad real de escurrimiento corresponde a la velocidad límite de depósito de la sección real de escurrimiento, y debe asociarse a un diámetro de tubería.

La sección real de escurrimiento puede hacerse equivalente a una sección circular, definiéndose de esta manera un diámetro al cual podría asociarse la velocidad límite de depósito obtenida. Sin embargo, esta misma velocidad límite puede considerarse válida para un diámetro equivalente a la altura vertical libre (H_L en la Figura 1) de la tubería.

Ante la imposibilidad de dilucidar a cual de los dos diámetros corres-

ponderaría la velocidad límite recién calculada, pero con la certeza que la primera posibilidad resulta poco conservadora y la segunda muy conservadora, se supondrá que esta velocidad límite corresponde a un diámetro intermedio entre los dos valores obtenidos. Lo más lógico es adoptar la semisuma de ambos diámetros, y considerar sólo como valor aproximado a la velocidad límite de depósito, la velocidad real de escurrimiento calculada.

iv) Para las condiciones en que se dispone de valores de velocidades límites, se calcula el valor teórico de este parámetro mediante los cuatro modelos de velocidad límite mencionados, y se hacen las comparaciones pertinentes.

5.2. Verificación de Modelos de Pérdidas de Carga

a) Tuberías de H.D.P. que conducen relaves en Talabre

TABLA 2

D mm	Cp %	d ₅₀ mcr	Vnf m/s	J o/oo	n —	f —	E ₁ mm	E ₂ mm	E ₃ mm
422,0	48	80	1,8	7	0,0104	0,0179	0,242	0,210	-0,156
422,0	48	80	2,1	8	0,0095	0,0150	0,088	0,058	-0,285
469,0	48	80	1,6	10	0,015	0,3591	0,2541	0,2540	0,2540
516,8	48	80	2,4	9	0,0101	0,0158	0,166	0,140	-0,156
558,6	48	80	2,05	6	0,0102	0,0156	0,164	0,133	-0,211

El valor de la rugosidad de Manning se obtuvo de acuerdo a la expresión:

$$n = \frac{R^{2/3} \sqrt{J}}{v}$$

A partir del valor del factor f que se calcula como:

$$f = \frac{2gDJ}{v^2}$$

se obtuvo el valor de la aspereza equivalente de Colebrook & White a través de la expresión

$$E = 3,7 \cdot D \cdot \left(10^{-1/2\sqrt{f}} - \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

donde $Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$ (ν' por ν en caso de Colebrook modificado).

E_1 se calcula con $\nu = 1,146 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

E_2 se calcula con $\nu' = 1,728 \cdot \nu$ (aplicando Thomas).

E_3 se calcula con $\nu'' = 10 \cdot \nu$ (Costantini).

De los resultados obtenidos puede deducirse lo siguiente:

- La relación de Manning aparece muy atractiva para evaluar pérdidas de carga en líneas de relave. Esto se visualiza en que los valores de la rugosidad obtenidos para los distintos casos analizados son muy similares entre sí.
- Aceptando la ecuación de Manning para la evaluación de la pérdida de carga, se aprecia claramente que la tubería de 469 mm opera embancada, dado el alto valor obtenido para la rugosidad en ese caso, el cual se escapa del resto de los valores obtenidos.
- No se aprecia una tendencia clara en el valor de la aspereza equivalente a emplear para el H.D.P., sea cual sea el modo de evaluar la viscosidad, en el caso de la ecuación de Colebrook & White.
- Se aprecia que la recomendación de Costantini respecto al empleo de la fórmula de Colebrook & White tiene por objeto realzar la importancia del efecto que provoca la mayor viscosidad de la pulpa respecto a la del agua, sobre la aspereza de la tubería. Esto lo confirman los valores de la aspereza equivalente obtenidos (E_3), los cuales resultan negativos, situación absurda desde el punto de vista de la definición de la aspereza equivalente. Estos valores negativos para la aspereza equivalente muestran que la razón entre la viscosidad de la pulpa y la del agua (ν'/ν) debe ser menor a 10, y que la recomendación de Costantini resultaría conservadora.

b) Tuberías que Conducen Arenas de Relave

TABLA 3

D mm	Cp %	d ₅₀ mcr	Vnf m/s	J o/oo	n —	Material
187,6	65	230	2,5	45	0,0110	H.D.P.
187,6	65	230	3,0	50	0,0102	H.D.P.
144	70	165	3,25	90	0,0101	Acero engomado
144	70	165	3,45	100	0,0100	Acero engomado

Puesto que no existe un conjunto de mediciones suficientes como para decidir qué fórmula es la indicada para la evaluación de la pérdida de carga, se acepta la relación de Manning, y se calcula la rugosidad para cada caso.

c) *Tuberías de Acero que conducen Relaves*

TABLA 4

D mm	Cp %	d ₅₀ mcr	Vnf m/s	J o/oo	n —	Material
438,15	45	37	1,767	7,46	0,0112	Acero
434,95	45	37	1,793	7,68	0,0111	Acero

5.3. *Modelo de Pérdida de Carga y Aplicabilidad*

De acuerdo a los valores entregados en el punto anterior, el modelo de pérdida de carga a emplear deberá ser el de Manning, restringido a que la velocidad de flujo esté por sobre la límite de depósito. Puesto que este último valor nunca es posible calcularlo con absoluta certeza, las rugosidades adoptadas para los diferentes casos analizados corresponden al mayor de los valores obtenidos en cada conjunto de mediciones.

TABLA 5

<i>Material tubería</i>	<i>Material conducido</i>	<i>Rugosidad de Manning</i>
H.D.P.	Relaves	0,0104
Acero	Relaves	0,0112
H.D.P.	Arenas a concentraciones altas.	0,0110
Acero revestido en goma	Arenas a concentraciones altas	0,0101

5.4. *Velocidad Real de Escurrimiento para Tuberías que Operan Embancadas*

De acuerdo a lo indicado en el punto 5.1, sólo es posible calcular la velocidad real de escurrimiento en la tubería de relaves de H.D.P. de

469 mm de diámetro interno, donde se dispone de valores de pérdida de carga.

Siguiendo la metodología especificada en el punto (iii) del acápite 5.1, los valores que se obtienen son los siguientes:

Sección real de escurrimiento: 0,1549 m².

Velocidad real de escurrimiento: 1,784 m/s.

Rugosidad compuesta: 0,0127.

Diámetro equivalente sección real de escurrimiento: 444 mm.

Altura vertical libre de escurrimiento: 394 mm.

Diámetro correspondiente a la velocidad calculada: 419 mm.

5.5. Verificación de los Distintos Modelos de Velocidad Límite Propuestos Respecto a los Valores Disponibles

La evaluación de los distintos modelos entrega los siguientes resultados:

TABLA 6

D mm	Cp %	d ₅₀ mcr	V _L medida m/s	Durand m/s	Velocidad Wasp m/s	Límite Teórica Oroskar & Turian m/s	Wasp Mod. m/s
187,6	60	250	~2,3	2,86	2,18	2,31	2,01
144,0	70	180	<2,0	2,35	1,89	1,89	1,70
155,0	70	125	>1,5	2,27	1,82	1,84	1,64
422	52	90	<1,8	3,47	2,38	2,86	2,23
419	48	80	~1,8	3,33	2,28	2,79	2,18
469	48	80	>1,8	3,51	2,37	2,93	2,26
516,8	48	80	<2,4	3,69	2,44	3,08	2,34
558,6	48	80	~2,05	3,84	2,51	3,19	2,40
438,15	45	37	<1,77	2,79	2,00	2,49	1,94
434,95	45	37	<1,79	2,78	1,99	2,49	1,93
339,75	45	37	<1,6	2,46	1,84	2,21	1,78

De los resultados obtenidos puede concluirse lo siguiente:

- Los modelos para estimación de velocidad límite en general sobreevalúan el valor que desde el punto de vista industrial interesa (ver capítulo 2), lo que los haría conservadores para un diseño.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, se aprecia que para pulpas de granulometrías gruesas, el modelo de Oroskar & Turian resulta el más

indicado, y para pulpas de granulometrías más finas el de Wasp modificado, pese a sobrevalorar la velocidad límite. La aplicabilidad de estos modelos se deduce a partir de la siguiente tabla de valores.

TABLA 7

D mm	Cp %	d ₅₀ mcr	V _L m/s	V _{LT} Velocidad Límite Teórica Oroskar & Turian Wasp Mod.		Razón entre velocidad Teórica y medida. (V _{LT} /V _L). Oroskar Wasp. Mod. & Turian	
				m/s	m/s		
187,6	60	250	~2,3	2,31	2,01	~1,00	~0,87
144,0	70	180	<2,0	1,89	1,70	>0,95	>0,85
155,0	70	125	>1,5	1,84	1,64	<1,23	<1,09
422	52	90	<1,8	2,86	2,23	>1,59	>1,24
419	48	80	~1,8	2,79	2,18	~1,55	~1,21
469	48	80	>1,8	2,93	2,26	<1,63	<1,26
516,8	48	80	<2,4	3,08	2,34	>1,28	>0,98
558,6	48	80	~2,05	3,19	2,40	~1,56	~1,17
438,15	45	37	<1,77	2,49	1,94	>1,41	>1,10
434,95	45	37	<1,79	2,49	1,93	>1,39	>1,08
339,75	45	37	<1,6	2,21	1,78	>1,38	>1,11

Considerando suspensiones de granulometría gruesa, a aquellas cuyo d₅₀ es mayor a 125 mcr, el modelo de Oroskar & Turian parece indicado para evaluar la velocidad límite.

Para pulpas de granulometría fina, el modelo de Wasp modificado resulta el más indicado, pese a que entrega valores muy conservadores. Los casos más dudosos en cuanto a la confiabilidad de este modelo lo constituyen aquel valor teórico que resulta menor a 1,09 veces el valor real, y aquel que resulta mayor a 0,98 veces la velocidad medida. Sin embargo, a la vista del resto de los antecedentes disponibles, resulta lógico pensar que ambas evaluaciones estarían más cerca del 109% que del 98% del valor real, y que el empleo de este modelo, reduciendo su valor teórico en un 5%, entregaría valores confiables para un diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- R1. AYALA R. LUIS. *Apuntes de curso hidráulica de transporte de sólidos*. U. de Chile, Santiago, Chile.
- R2. DIVISIÓN ANDINA - CODELCO CHILE. *Reunión de especialistas sobre depositación de relaves*. Superintendencia General Concentrador. D. Andina, Jahuel, octubre. 7.11.1979.
- R3. EDWARDS V. ALFREDO. *Factibilidad técnica y económica del transporte hidráulico de concentrados de cobre y su aplicación a los planes de ampliación de División Andina*. U. de Chile, Santiago 1983.
- R4. WASP, KENNY, GANDHI. *Solid Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation*. California, 1977.