

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke



PÉRDIDAS DE CARGA POR INFLUENCIA DE
RELAVES ESPESADOS EN LOOP DE BOMBEO

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

DIEGO ALBERTO ENRIQUE HOEBEL FUENTES

CONCEPCIÓN, NOVIEMBRE DE 2015

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción
B_i	Número de Bingham
C_v	Concentración en volumen
d	Diámetro de la partícula
D	Diámetro interno de la tubería
D_e	Diámetro equivalente
f_D	Factor de fricción Darcy
f_F	Factor de fricción Fanning
GE	Gravedad específica
g	Aceleración de gravedad
He	Número de Hedström
J	Pérdida de carga unitaria
K	Índice de consistencia del fluido
L	Largo de tubería
M	Muestra ensayada
\bar{x}	Media de la Muestra
Z	Distribución Normal
m	Pendiente
n	Rugosidad de Manning
Q	Caudal (Volumétrico)
R	Radio de la sección transversal
R^2	Coefficiente de determinación
R_H	Radio hidráulico
Re	Número de Reynolds
Re_2	Número de Reynolds para canales abiertos
Re_c	Número de Reynolds crítico
Re_r	Número de Reynolds Rugosidad
u	Velocidad Puntual
V	Velocidad media

V_*	Velocidad de fricción
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación angular o razón de corte
ε	Rugosidad, aspereza
μ	Viscosidad dinámica
μ_B	Viscosidad dinámica Bingham
ρ	Densidad del fluido o pulpa
τ	Esfuerzo de corte
τ_0	Esfuerzo de corte en la pared
τ_f	Esfuerzo de corte de fluencia
σ	Desviación Estándar
α	Nivel de Significancia
\emptyset	Razón, entre esfuerzo de corte en la pared y fluencia
Sub índices	
85	85th percentil de partículas pasantes
0	En la pared de la tubería o canal
c	crítica
l	Líquido
m	Pulpa (mezcla)
s	Sólido
v	Volumétrico

GLOSARIO.

Reología:	Ciencia que estudia el flujo de la materia.
Fluido Newtoniano:	Cualquier fluido que tenga una relación directamente proporcional entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación angular.
Fluido No Newtoniano:	Cualquier fluido que no tenga una relación directamente proporcional entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación angular.
Flujo Laminar:	Flujo en que las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias suaves en láminas, o capas, con una capa deslizándose suavemente sobre una capa adyacente. La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua las tendencias a la turbulencia.
Flujo Turbulento:	Flujo en que las partículas del fluido se mueven de forma desordenada en todas direcciones. Las fuerzas inerciales predominan sobre las fuerzas viscosas.
Número de Reynolds:	Número adimensional proporcional a la razón entre las fuerzas inerciales y viscosas. El número es expresado en términos de la velocidad, densidad, viscosidad del fluido y un largo característico.

ÍNDICE GENERAL

NOMENCLATURA.....	ii
GLOSARIO.....	iv
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Justificación del Tema.....	3
1.2 Alcance del Estudio.....	4
1.3 Objetivos del Estudio.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	6
2.1 Modelo Reológico.....	6
2.2 Definición de Parámetros Reológicos.....	6
2.2.1 Viscosidad.....	6
2.2.2 Tensión de Corte.....	7
2.3 Dependencia de los Parámetros Reológicos de una Pulpa.....	7
2.4 Densidad de Pulpa.....	8
3 PÉRDIDAS DE CARGA EN SUSPENSIONES SÓLIDO-LÍQUIDO.....	9
3.1 Tipos de Esgurrimiento en el Transporte de Pulpa.....	9
3.2 Pérdidas de Carga en Pulpas.....	10
3.2.1 Pérdida de Carga y Reología en Tuberías.....	10
a) Fricción.....	10
b) Fricción en Régimen Laminar.....	11
c) Transición Laminar Turbulento.....	12
d) Fricción en Régimen Turbulento.....	13
4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	16
4.1 Antecedentes Generales.....	17
4.2 Loop de Bombeo.....	17
4.3 Descripción del Sistema de Transporte de Relaves.....	18

4.4	Medición en el Sistema de Transporte de Relaves	19
4.4.1	Medición de las Condiciones de Recirculación.....	20
4.4.2	Medición de las Condiciones de la Pulpa.....	20
	a) Granulometría.....	20
	b) Reología	21
4.5	Cálculo del Número de Reynolds y Reynolds Crítico	21
4.6	Análisis de los Factores de fricción	22
4.6.1	Análisis de los Regímenes de Flujo.....	22
	a) Régimen Laminar.....	22
	b) Régimen Turbulento y Transición	22
4.7	Cálculo de las Pérdidas de Carga.....	23
4.7.1	Pérdidas de Carga Medidas	23
4.7.2	Pérdidas de Carga Estimadas.....	23
4.8	Análisis de Sensibilidad.....	23
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	25
5.1	Factores de Fricción Experimentales.....	25
5.2	Análisis de los Regímenes de Flujo Estimados	25
5.3	Modelo de Predicción Elegido.....	26
5.4	Factores que inciden en las pérdidas de carga	28
	5.4.1 Diámetro	28
	5.4.2 Caudal.....	29
	5.4.3 Concentración de Sólidos	30
6	CONCLUSIONES	31
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Reynolds Críticos Para Diferentes Rangos del Número de Hedström.....	13
Tabla N°2. Granulometría de las Muestras	21
Tabla N°3. Etiquetas según criterio de Fuentes y Slatter.....	22
Tabla N°4. Combinaciones Usadas en Análisis de Sensibilidad.....	24
Tabla N°5. Coeficientes de determinación (R^2).....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Esquema Loop de bombeo.....	19
Figura N°2. Ábaco de Moody, mediciones utilizando Re_2	25
Figura N°3. Factores de fricción calculados (Moody Re_2).....	26
Figura N°4. Modelo de Predicción Elegido.....	27
Figura N°5. Pérdidas de carga estimadas versus Diámetro de tubería.....	28
Figura N°6. Pérdidas de carga estimadas versus Caudal.....	29
Figura N°7. Pérdidas de carga estimadas versus Concentración de Sólidos.....	30

“PÉRDIDAS DE CARGA POR INFLUENCIA DE RELAVES ESPESADOS EN LOOP DE BOMBEO”

Autor: Diego Hoebel Fuentes.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

Correo Electrónico: Diego.Hoebel@gmail.com

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

Correo Electrónico: asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

La minería produce toneladas de desechos durante la extracción de los minerales. Estos desechos se conocen con el nombre de relaves y son básicamente la combinación de un líquido transportante con partículas sólidas, parciales o completamente suspendidas.

Recientemente, en el norte de Chile, se han estado implementando los trabajos con relaves espesados (Transporte y depositación), los cuales presentan mayor concentración de sólidos que los convencionales, con el fin de recuperar el agua de los procesos y reutilizarla, disminuyendo el problema de escases de este recurso en las faenas mineras.

Bajo esta premisa, se plantea el desarrollo de un estudio experimental que simula el transporte de relaves desde los espesadores hasta los tranques de relaves. En éste se medirá la pérdida de carga producida por la circulación del fluido bajo presión a distintos niveles de concentración y diámetro de circulación, con el fin de verificar si los modelos de predicción de pérdida de carga utilizados se pueden ajustar a este fluido, y ser usados como base para el diseño de estos sistemas de transporte.

Para lograr dichos propósitos, se elaboró una serie de pruebas en las cuales se registró las pérdidas de carga del fluido y sus parámetros reológicos; información utilizada para obtener las pérdidas de carga teóricas y compararlas con las experimentales.

Los resultados muestran una baja correlación entre los resultados experimentales y teóricos, y a su vez una gran dependencia de las pérdidas de carga con el diámetro de la tubería y la concentración del fluido.

Palabras claves: Relaves espesados, transporte, Pérdidas de carga.

Número de Palabras: 7.156 Palabras Texto + 12 Figuras/Tablas * 250 = 10.156

“HEAD LOSSES BY INFLUENCE OF THICKENED TAILINGS IN PUMP LOOPS”

Author: Diego Hoebel Fuentes.

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Bío Bío

E-mail: Diego.Hoebel@gmail.com

Adviser: Álvaro Suazo Schwencke

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Bío Bío

E-mail: asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

Mining produces tons of waste during the extraction of minerals. Such wastes are known by the name of tailings and are basically a combination of a transportable liquid with solid, partial or fully suspended particles.

Recently, in the north of Chile, it has been implementing work with thickened tailings (transportation and deposition), which have a higher concentration of solids than conventional ones, in order to recover and reuse the processes water reducing the problem of shortage of this resource in mining operations.

Under this premise, the development of an experimental study that simulates the transport of tailings from the thickeners to the tailings dam is raised. This head loss caused by the circulation of fluid under pressure at various levels of concentration and diameter of circulation will be measured in order to verify whether the prediction models of pressure drop used, can be adjusted to this fluid, and be used as a basis for the design of these transport systems.

To achieve these purposes, a series of tests were developed and it was recorded the head losses of fluid and its rheological parameters; information used to obtain the theoretical load losses and compare then with experimental data.

The results show a low correlation between experimental and theoretical results, and also a great dependence on the head losses with the diameter of the pipe and fluid concentration.

Keywords: Thickened tailings, transport, head losses.

1 INTRODUCCIÓN

En el norte de Chile las operaciones de la gran minería se encuentran ubicadas en una de las zonas más secas del mundo. Hoy en día, el suministro de agua se ha convertido en un problema que las mineras abordan desde la fase inicial de sus proyectos, o que deben afrontar al evaluar una ampliación de sus operaciones. Sumado a esto, el incremento en las exigencias medioambientales para el otorgamiento de los derechos por el aprovechamiento del recurso natural, hacen hoy que el manejo de los relaves tenga un vuelco importante.

El relave, conocido más bien con el nombre de pulpa, es lo que queda una vez extraído el mineral de importancia. Esta mezcla es básicamente la combinación de un líquido transportante en el cual están inmersas partículas sólidas parcial o completamente suspendidas. Por lo general tiene una concentración en peso mayor al 2% y puede llegar a valores cercanos del 60%.

El manejo de los relaves es uno de los aspectos más importantes dentro de un proyecto minero con planta concentradora, que incluye el transporte y depositación, siendo éstos los dos grandes desafíos del manejo de relaves luego de su producción.

En el caso del transporte de pulpa, uno de los aspectos críticos es determinar la forma en que se va a comportar el material en el sistema de transporte, debido a la natural variabilidad del mineral.

La necesidad de mejorar la recuperación de agua, las normas ambientales y la estabilidad sísmica ha llevado a la implementación de técnicas que mejoren la recuperación de este recurso desde los relaves. Hace ya algún tiempo se han estado implementando los relaves espesados, que por medio de la extracción de agua mediante espesadores han alcanzado un porcentaje de sólidos que fluctúa entre el 60 y 75%, solucionando varios problemas técnicos, ambientales y económicos pero también abriendo las puertas a nuevas investigaciones ya que no se sabe su comportamiento a escala real.

1.1 Justificación del Tema

La tecnología de los relaves espesados en los últimos años ha alcanzado un interesante desarrollo en ingeniería y tecnología para la administración y cuidado de este desecho minero, y se vuelve cada vez más atractiva para las empresas mineras debido a sus bondadosos atributos.

Recientemente en Chile se han implementado las primeras operaciones de relaves espesados. Esta tecnología en general presenta varias ventajas con respecto a los relaves convencionales, ya sea:

- Estabilidad en el tranque de depositación y disminución de su superficie,
- Recuperación de agua,
- Menor impacto ambiental (baja infiltración en el subsuelo, bajas emisiones de polvo)

Sin embargo por ser un tema nuevo no se cuenta con la información suficiente que permita saber su comportamiento a escala real. Es por esto que se están realizando pruebas piloto en donde se pretende simular el comportamiento de este nuevo material y así poder definir de mejor forma cómo se comportará bajo las condiciones reales de trabajo. En particular este trabajo se enfoca en las pérdidas de carga que se producen en el sistema de transporte.

1.2 Alcance del Estudio

La investigación propuesta en este documento se enfocará en pruebas piloto para minería, específicamente en el transporte de relaves o loop de bombeo, que es un sistema capaz de simular a escala real el comportamiento hidráulico de este material, pudiendo obtener en su transcurso datos importantes de la pulpa que servirán para caracterizarla y diseñar posteriormente.

Una de las principales características de este sistema de bombeo es que entrega las pérdidas de carga mediante manómetros dispuestos en un tramo de tubería determinado, estando aquí el centro de atención de esta investigación.

Luego de recopilar la información necesaria de las distintas experiencias realizadas con relaves y sus teorías para el cálculo de pérdidas de carga, éstas se verificarán y se verá de qué manera se ajustan a los valores obtenidos en la simulación.

1.3 Objetivos del Estudio

1.3.1 Objetivo General

- Analizar las pérdidas de carga en el sistema de impulsión en régimen permanente de relaves espesados a distintos niveles de concentración, y separados en distintas fracciones (relave total, lamas, arenas), verificando la influencia de las distintas variables en el proceso.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las diferentes fracciones de relave en estudio.
- Identificar las variables relevantes en el análisis y modelos predictivos de pérdidas de carga, y cómo se ajustan éstas al trabajo con relaves.
- Comparar los resultados de circulación con dos diámetros de tuberías y distintas concentraciones de sólidos
- Comparar los efectos de cada fracción en el sistema de impulsión.
- Contrastar los resultados obtenidos de modelos teóricos con los obtenidos experimentalmente y ver el que mejor se ajusta.

2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Para comenzar el análisis se considerará que existe información acotada disponible sobre relaves espesados, en cuanto al transporte de éste como desecho minero. Sin embargo, se recopilaron y citaron varias expresiones y conceptos, siendo éstas logradas empíricamente en su mayoría, incluyéndose experiencias de relaves chilenos, lo que disminuye en alguna medida, la incertidumbre que podría haber en los resultados.

En primer lugar se expondrán a grandes rasgos las variables que influyen en el transporte hidráulico de sólidos, teniendo en cuenta los estudios realizados en los últimos tiempos por autores consolidados en la materia. Seguido de lo anterior, se profundizará y señalará específicamente las ecuaciones y modificaciones propuestas para el relave, el cual no se comporta como un fluido newtoniano pero presenta una conexión importante con la base teórica convencional.

Desde los inicios del siglo XX se pudo notar que muchos fluidos mostraban comportamientos que no eran descriptibles con la ley de la viscosidad de Newton, por lo que se les denominó fluidos No Newtonianos. Ocurre que en el caso de las pulpas mineras, éstas con frecuencia se comportan como fluidos no Newtonianos por lo que es necesario describir algunos conceptos reológicos.

2.1 Modelo Reológico

En términos simples, éste es una expresión de la curva reológica, la cual expresa la relación entre el esfuerzo y la deformación de un sólido. El modelo que se utilizará como base en la reología de suspensiones es:

- Bingham:

$$\tau = \tau_f + \mu_B \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Plástico ideal})$$

Ecuación 1

2.2 Definición de Parámetros Reológicos

2.2.1 Viscosidad

Comparado con los fluidos Newtonianos, donde solo es necesario conocer la viscosidad para evaluar y comparar el comportamiento en régimen laminar, en los fluidos no Newtonianos el

comportamiento es un poco más complejo. La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. En este caso se empleará la viscosidad Bingham, μ_B , que es la que arroja el ensayo reológico para predecir y correlacionar datos de flujo en tuberías.

2.2.2 Tensión de Corte

Es aquella que, fijado un plano, actúa tangente al mismo.

2.3 Dependencia de los Parámetros Reológicos de una Pulpa

Las propiedades físico-químicas de las pulpas minerales determinan cómo las partículas interactúan entre ellas y con el agua que las rodea. Es importante entender que el tipo de interacción determina la reología de una suspensión dada.

Los relaves son de una composición bastante diversa, dependiendo del tipo de mineral extraído del yacimiento. Por ende las propiedades reológicas son variables. Sin embargo en general se considera que los parámetros reológicos dependen principalmente de:

- Concentración
- Granulometría
- pH

Estas variables son, en la mayoría de los casos, suficientes para relaves llamados “normales”, pero no para relaves demasiado finos con alto contenido de arcillas, en los cuales la interacción físico-química entre las partículas es muy relevante y estas variables no son suficientes, por lo que se hace necesario el análisis de cada caso en particular.

a) Efecto de la Concentración en la Viscosidad: La viscosidad crece con la concentración de sólidos. Para concentraciones relativamente bajas la viscosidad crece suavemente y para valores elevados lo hace en forma muy rápida. En particular para la máxima fracción volumétrica alcanzable o concentración de empaquetamiento $C_v \text{ max}$ la viscosidad tiende a infinito (Cooke, 2006).

b) Efecto de la concentración en la Tensión de Corte: La tensión de corte (τ_f) crece rápidamente en función de la concentración (C_v), de manera similar al caso de la viscosidad. Sin embargo, cuando la concentración es nula la tensión de corte es cero. Aparentemente no existe un modelo

teórico satisfactorio para explicar la relación entre la tensión de corte y la concentración de sólidos. Por otra parte, existen numerosas fórmulas empíricas, y en el caso de las pulpas minerales resulta ventajoso el utilizar relaciones del tipo (Cooke, 2006):

$$\tau_f = C_3 \cdot C_v^{C_4} \quad \text{Ecuación 2}$$

2.4 Densidad de Pulpa

La densidad de pulpa (ρ_m) en el caso de relaves espesados presenta un claro aumento en comparación a los relaves convencionales alcanzando valores entre los 1.645-1.876 (Kg/m³), siendo posible obtenerlo por medición de probeta o por la expresión que relaciona la gravedad específica (GE) con la concentración de sólidos (Fuentes, 2005):

$$\rho_m = \frac{-GE}{GE \cdot \frac{\%sólidos}{100} - GE - \frac{\%sólidos}{100}} \quad \text{Ecuación 3}$$

3 PÉRDIDAS DE CARGA EN SUSPENSIONES SÓLIDO-LÍQUIDO

El escurrimiento de un fluido homogéneo, ya sea en ductos a presión o canales, mantiene características semejantes cualquiera sea su densidad, viscosidad o velocidad. En el caso de las suspensiones, el escenario cambia aun cuando la concentración sea pequeña. La presencia de las partículas sólidas modifica profundamente el comportamiento de la pulpa.

3.1 Tipos de Escurrimiento en el Transporte de Pulpa

Para el transporte hidráulico de sólidos, se definen los siguientes tipos de pulpas:

- Suspensiones Homogéneas, las cuales presentan una distribución uniforme de los sólidos en el líquido. Por lo general corresponden a partículas muy pequeñas a concentraciones muy altas, y usualmente presentan un comportamiento No Newtoniano.
- Suspensiones Heterogéneas, donde los sólidos presentan una distribución no uniforme en el medio líquido, existe un gradiente de concentración en el eje vertical. El efecto inercial de las partículas es considerable y el efecto sobre la viscosidad del líquido transportador es pequeño. Este tipo de pulpa tiene menores concentraciones que las pulpas homogéneas así como también un tamaño de partícula mayor.
- Suspensiones Mixtas: Son aquéllas donde se cumple que los sólidos tienen una amplia distribución granulométrica, por lo que suele ocurrir que los finos se comporten como un pseudo fluido que sirve de vehículo para el transporte heterogéneo de las partículas más gruesas.

Existen una gran cantidad de criterios propuestos para determinar si un flujo es Homogéneo, Heterogéneo o Mixto, dependiendo estos de diversos factores, siendo los siguientes los más relevantes:

- Concentración de sólidos: Las pérdidas de carga son directamente proporcionales a la concentración de sólidos.
- Tamaño de partículas: Por su efecto inercial sobre el flujo.
- Interacción sólido - líquido
- Turbulencia: Las ecuaciones para el cálculo de pérdidas de carga trabajan básicamente con flujos turbulentos.

- pH: Es un indicador de varios aspectos, como el potencial Zeta, cargas eléctricas, composición mineralógica.

3.2 Pérdidas de Carga en Pulpas

Existen varias fórmulas de pérdida de carga en literatura especializada, las que se pueden agrupar en:

- Fórmulas puramente empíricas,
- Fórmulas que contienen algunos elementos conceptuales físicos,
- Fórmulas que se basan en principios reológicos,
- Fórmulas combinadas

3.2.1 Pérdida de Carga y Reología en Tuberías

En la mayor parte de los casos se espera que el escurrimiento sea turbulento. Sin embargo se expondrán relaciones básicas para régimen laminar, debido a que es una referencia con respecto al comienzo del régimen turbulento (límite básico). Es necesario conocerlo para poder estudiar la transición y por el auge que tiene últimamente el flujo de relaves espesados.

a) Fricción

Los factores de fricción de Fanning, f_F , y Darcy, f_D , se encuentran presentes en las siguientes relaciones:

$$\tau_0 = f_F \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$J = \frac{f_D}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 5}$$

Igualmente, se establece una condición básica a partir del teorema de la cantidad de movimiento:

$$\tau_0 = (\rho \cdot g \cdot J) \cdot \frac{D}{4} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$f_D = 4 \cdot f_F \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

τ_0 : Esfuerzo de Corte en la Pared

ρ : Densidad del fluido o pulpa

V : Velocidad media

J : Pérdida de carga unitaria

D : Diámetro interno de la tubería

b) Fricción en Régimen Laminar

En el caso de flujo laminar en tuberías, se cumple que la tensión de corte en el eje es cero y se incrementa hacia las paredes de manera lineal. Por otro lado, la velocidad del fluido es nula en las paredes.

Luego, se puede encontrar una relación entre el caudal y el modelo reológico del fluido. De la definición de caudal Q se tiene:

$$Q = \pi \cdot R^2 \cdot V = 2 \cdot \pi \int_0^R u \cdot r \cdot dr \quad \text{Ecuación 8}$$

Integrando por partes e imponiendo $u=0$ para $r = R$, queda:

$$Q = -\pi \cdot \int_0^R \frac{du}{dr} \cdot r^2 \cdot dr = -\pi \cdot \int_0^R \dot{\gamma} \cdot r^2 \cdot dr \quad \text{Ecuación 9}$$

Utilizando el modelo reológico expuesto en 2.1, despejando $\dot{\gamma}$ en función de la tensión de corte, y ésta en función de r , la integral anterior puede ser resuelta. Si se utiliza el modelo Plástico Bingham, se llega a la siguiente expresión:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \tau_0}{4 \cdot \mu_B} \left(1 - \frac{4}{3} \phi + \frac{1}{3} \phi^4 \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

$$\phi \equiv \frac{\tau_f}{\tau_0} \quad \text{Ecuación 11}$$

La Ecuación 10 es conocida como la ecuación de Buckingham (1921). Esta ecuación fue modificada por Hedström (Darby, 1952), dejando el factor de fricción en función del Número de Reynolds y Hedström, lo que hace que su empleo sea mucho más simple:

$$\frac{1}{Re} = \frac{f_F}{16} - \frac{He}{6 \cdot Re^2} + \frac{He^4}{3 \cdot f_F^3 Re^8} \quad \text{Ecuación 12}$$

O bien:

$$f_F = \frac{16}{Re} \cdot \left[1 + \frac{He}{6 \cdot Re} - \frac{He^4}{3f_F^3 Re^7} \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

El número adimensional de Reynolds para un fluido plástico Bingham queda definido como:

$$Re_B = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu_B} \quad \text{Ecuación 14}$$

A su vez el Número de Hedström:

$$He = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot \tau_f}{\mu_B^2} \quad \text{Ecuación 15}$$

El número de Hedström es el producto del Número de Reynolds y el Número de Bingham (Bi). Este último es una relación entre la tensión de fluencia y las tensiones viscosas en un fluido plástico.

$$Bi = \frac{\tau_f \cdot D}{\mu_B \cdot V} \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

μ_B : Viscosidad dinámica Bingham

c) Transición Laminar Turbulento

Al igual que para los fluidos Newtonianos existe un valor crítico de Reynolds, Re_c , para el cual el flujo deja de ser laminar y aparece la turbulencia. En el caso de fluidos Newtonianos en tuberías circulares este valor es cercano y un poco mayor a 2000. Este mismo fenómeno ocurre en el transporte de pulpa donde los fluidos no son Newtonianos y por lo general este Número de Reynolds crítico es más grande. Es importante conocer este valor porque en muchas ocasiones la suspensión depende del régimen turbulento.

Para el caso del fluido Heschel y Bulkley, Hanks (1978) desarrolló una expresión para el cálculo de Re_c , la que para fluidos Bingham tiene la siguiente forma:

$$Re_c = \frac{He}{8} \cdot \frac{1 - \frac{4}{3}\phi_c + \frac{1}{3}\phi_c^4}{\phi_c} \quad \text{Ecuación 17}$$

El valor de $\phi = \phi_c$ puede calcularse empleando la siguiente relación utilizando el Número de Hedström:

$$\frac{\phi_c}{(1 - \phi_c)^3} = \frac{He}{16800} \tag{Ecuación 18}$$

$$He = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot \tau_f}{\mu_B^2} \tag{Ecuación 19}$$

Luego, debido a la mayor disponibilidad de datos experimentales, se ha observado para $He > 20000$ la fórmula de Hanks subestima los valores de Re_c . Para este intervalo los valores de Re_c pueden obtenerse mediante la siguiente expresión empírica desarrollada por Fuentes (2005):

$$Re_c = (Re_c)_0 \frac{1}{25} (He + 128000)^{11/40} \tag{Ecuación 20}$$

Dónde:

$(Re_c)_0$: es el valor de Re_c calculado con la fórmula de Hanks.

Por otra parte, basándose en el análisis de una amplia base de datos, Slatter y Wasp (Slatter, 2002) presentaron tres correlaciones entre Re_c y He para fluidos plásticos Bingham, aplicadas a tuberías, las que se muestran en la Tabla N°1.

Tabla N°1. Reynolds Críticos Para Diferentes Rangos del Número de Hedström.

Número de Hedström	Número de Reynolds Crítico
$He < 1,7 \times 10^3$	$Re_c = 2100$
$1,7 \times 10^3 < He < 1,5 \times 10^5$	$Re_c = 155 \times He^{0.35}$
$1,5 \times 10^5 < He$	$Re_c = 26 \times He^{0.5}$

d) Fricción en Régimen Turbulento

Algunos de los modelos que se exponen a continuación permiten el cálculo de la velocidad de fricción, la cual es una velocidad de referencia ficticia definida por:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = V \cdot \sqrt{\frac{f_D}{8}} \tag{Ecuación 21}$$

Mediante el uso de la expresión anterior es posible obtener el factor de fricción de Darcy, f_D .

- Modelo de Darby

Hanks y Dadia (1971) desarrollaron un modelo para flujos turbulentos de fluidos Bingham. Estas ecuaciones fueron modificadas por Darby (1981) y Darby et al. (1992), encontrando el factor de fricción en régimen turbulento de la siguiente forma:

$$f_F = 10^a Re_B^b \tag{Ecuación 22}$$

Dónde:

$$a = -147 \left[1 + 0,146 \cdot e^{-20 \cdot 10^{-5} \cdot He} \right] \tag{Ecuación 23}$$

$$b = -0,193 \tag{Ecuación 24}$$

Los valores de a y b están basados en datos experimentales de flujo en tuberías.

Darby (1992) notó que los fluidos Bingham no exhiben gran cambio en la transición laminar-turbulenta, y propuso la siguiente ecuación para combinar ambos factores de fricción:

$$f_F = (f_{FL}^m + f_{FT}^m)^{1/m} \tag{Ecuación 25}$$

Dónde:

$$m = 17 + \frac{40000}{Re_B} \tag{Ecuación 26}$$

- Modelo de Slatter (Slatter, 1994)

Slatter desarrolló un modelo relativamente simple, que puede ser interpretado en términos del efecto de las partículas en la rugosidad. Para ello formula un Número de Reynolds que toma en cuenta la reología completa y un diámetro característico de las partículas, d_{85} .

Número de Reynolds de rugosidad Re_r :

$$Re_r = \frac{8 \cdot \rho \cdot V_*^2}{\tau_f + K \left(\frac{8 \cdot V_*}{d_{85}} \right)^n} \tag{Ecuación 27}$$

Para flujo de pared lisa ($Re_r < 3,32$):

$$\frac{V}{V_*} = 2,5 \cdot \ln \left(\frac{R}{d_{85}} \right) + 2,5 \cdot \ln(Re_r) + 17,5 \tag{Ecuación 28}$$

Para flujo de pared rugosa totalmente desarrollado (turbulento) ($Re_r > 3,32$):

$$\frac{V}{V_*} = 2,5 \cdot \ln\left(\frac{R}{d_{85}}\right) + 4,75$$

Ecuación 29

- Colebrook & White

Para flujo turbulento en fluidos homogéneos Newtonianos, hoy en día la fórmula más aceptada es la de Colebrook & White (1937, 1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log\left(0,24 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,5}{Re \cdot \sqrt{f_D}}\right)$$

Ecuación 30

ε : Rugosidad (Nikuradse).

Para fluidos Bingham se ha encontrado que los valores de los factores de fricción en flujo turbulento coinciden bien con los obtenidos por esta ecuación utilizando Re_B . Esto se puede interpretar suponiendo que la turbulencia destruye la estructura resistente del plástico Bingham que se manifiesta en el esfuerzo de fluencia τ_f . Así, el fluido Bingham se comportaría como fluido Newtoniano (Barbera, 2005).

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el desarrollo de este estudio se realizará:

- Revisión de la bibliografía disponible acerca de las pulpas minerales, el flujo de pulpas y fluidos no Newtonianos.
- Se identificarán las variables más importantes que influyen en la obtención de los resultados.
- Se describirá el trabajo realizado en terreno para la obtención de los datos analizados.
- Se describirán y analizarán las condiciones de recirculación y características de la pulpa en el sistema de transporte de Relaves de ASMIN.
- Se analizarán las características reológicas de la pulpa para distintas concentraciones obtenidas en los ensayos reológicos.
- Se comparará las pérdidas de carga obtenidas experimentalmente con las obtenidas de modelos teóricos, identificando el modelo de predicción de pérdidas de carga que represente de mejor forma el fluido en estudio.
- Se determinará de qué forma afecta:
 - El cambio de sección manteniendo constante la concentración de sólidos. Se graficará el diámetro versus las pérdidas de carga para cada una de las muestras y se verá la tendencia que presenta.
 - El cambio de granulometría manteniendo constante la sección y el porcentaje de sólidos, graficando las muestras según su granulometría versus las pérdidas de carga para cada uno.
 - La variación en la concentración de sólidos con respecto a las pérdidas de carga.
 - La separación en lamas y arena; en otras palabras, de qué forma afecta que sólo circulen finos o gruesos para las pérdidas de carga. Se graficará lamas y arenas versus pérdidas de carga y se comparará con las pérdidas de carga obtenidas en las muestras M1, M2 y M3.
 - El cambio de concentración en la viscosidad y las pérdidas de carga, graficando cada una de las mediciones realizadas.

4.1 Antecedentes Generales

Una Sociedad Minera con faena en el norte de Chile, con la colaboración de ASMIN Industrial, empresa que ofrece servicios de pruebas mineras a escala de laboratorio, se encuentra desarrollando los estudios de pre-factibilidad de la explotación de sus recursos sulfurados. Estos contemplan la ejecución del estudio de dos plantas concentradoras, además de las soluciones para los sistemas de suministro de agua, energía y el manejo y disposición de los relaves generados.

Como objetivo de la campaña, se encuentra evaluar el comportamiento metalúrgico del compósito, a fin de:

- Obtener información metalúrgica del comportamiento del Cu, Mo y Au, para ser utilizada como soporte técnico en el proyecto de ingeniería de pre-factibilidad.
- Generar relaves, en 3 condiciones de granulometrías, correspondiente a fina (160 μm), media (180 μm) y gruesa (220 μm), las cuales se nombrarán con M1, M2 y M3 respectivamente, para ensayos piloto de sedimentación, reología, transporte y depositación.
- Obtener concentrados colectivos para pruebas, a escala de laboratorio, de separación selectiva de Cu/Mo.

Para el desarrollo del plan minero se diseñó un programa experimental de flotación a escala piloto, del cual se obtuvo como resultado el mineral a extraer y material de desecho. Este último, conocido con el nombre de relave, es el de interés para esta investigación.

Una vez finalizada la etapa de flotación se transportan los relaves hasta los espesadores que son los equipos encargados de la extracción de agua mediante aditivos químicos los cuales aceleran la decantación del sólido de la mezcla produciendo relaves con mayor porcentaje de sólidos.

4.2 Loop de Bombeo

Consiste en un sistema de tuberías implementadas por la empresa ejecutora del proyecto, en el cual mediante un sistema de bombeo se impulsa el fluido, en este caso el relave.

Las pruebas de bombeo de relaves tienen como objetivo estimar las pérdidas de carga producidas por el relave para distintos caudales, concentraciones de sólidos y diámetro de tuberías en una longitud determinada.

Las muestras utilizadas en la prueba son las obtenidas de los espesadores una vez que han alcanzado la concentración de sólidos requerida y corresponden a M1, M2 y M3.

Luego de ensayadas estas muestras se procedió a mezclarlas para la obtención de lamas y arenas que es más que nada separar en dos fracciones, fino y grueso, a través de un hidrociclón, pensando en una futura utilización de la arena para el tranque de relaves.

4.3 Descripción del Sistema de Transporte de Relaves

Las pruebas realizadas en el sistema de transporte de relaves se llevaron a cabo en la empresa ASMIN, ubicada en la región Metropolitana. El circuito inicia con un estanque de 12 m³, en el cual está la muestra requerida a la concentración que se desea ensayar, la que se encuentra en agitación por medio de aspas para su homogeneización. Luego de esto el relave es conducido por medio de una bomba centrífuga hacia una tubería horizontal, que cuenta con 3 cambios de sección dependiendo de los requerimientos. En este tramo horizontal las tuberías precisan de cuatro manómetros que miden la caída de presión además de flujómetros portátiles para ir monitoreando los caudales. Posterior a esto el flujo asciende hasta un estanque ubicado a ocho metros de altura y comienza a descender por una tubería de forma gravitacional hasta llegar al punto de partida de la prueba.

La prueba comienza con un porcentaje de sólidos y diámetro definido. La idea es, a través del variador de frecuencia de la bomba centrífuga, encontrar el máximo, mínimo y valores intermedios de flujos para esos requisitos. Por cada flujo se hacen 3 mediciones de presión en la línea horizontal y al mismo tiempo se toman muestras para analizar la reología de la pulpa que entrega la viscosidad, esfuerzo de corte, temperatura, pH y confirma que el porcentaje de sólidos continúe dentro del valor deseado ya que la recirculación por un tiempo prolongado hace que el fluido eleve su temperatura y por evaporación del agua aumente el porcentaje de sólidos. Se repiten estos pasos hasta completar el rango de flujos que soporte la bomba. El circuito que debe realizar el fluido se muestra en la Figura N°1.

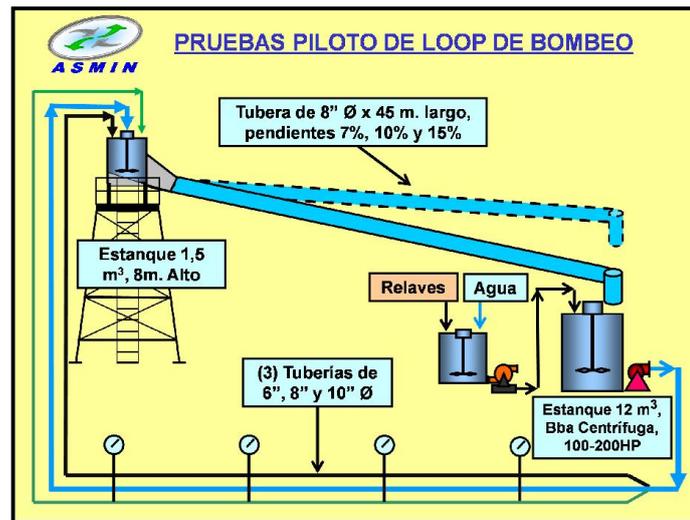


Figura N°1. Esquema Loop de bombeo.

4.4 Medición en el Sistema de Transporte de Relaves

Para la validación de los modelos expuestos en 3.2, fue necesario realizar mediciones en terreno a fin de contrastar la teoría con la realidad. Estas mediciones se realizaron en el loop de bombeo de la empresa ASMIN.

La correcta operación del sistema de transporte de relaves es de vital importancia. Si bien no influye directamente en el producto final de la Planta Concentradora, el hecho de ser un proceso de operación continua implica que cualquier mal funcionamiento se traduce en una reducción del tonelaje de mineral procesado, o bien en un perjuicio para el medio ambiente. Es por esto último que se debe ser minucioso en su operación ya que los parámetros obtenidos en esta prueba son utilizados directamente en el diseño de este sistema. Es interesante mencionar que existe la oportunidad de probar distintas combinaciones de resultados y contar con los antecedentes utilizados para tomar la mejor decisión de diseño.

Las mediciones realizadas fueron las siguientes:

- Flujo de pulpa mediante flujómetros instalados en las tuberías ensayadas.
- Concentración de sólidos, medidos mediante el método de la probeta y medición en base seca en el estanque de almacenamiento.
- Caída de presión, medidos en 4 manómetros que se encuentran en la tubería horizontal de bombeo.
- Reología mediante procedimiento ASMIN, utilizando el modelo Bingham, en el cual obtenemos viscosidad, esfuerzo de corte, pH y temperatura.

4.4.1 *Medición de las Condiciones de Recirculación*

Las condiciones de flujo en la tubería de transporte de relaves consistieron en el registro del caudal recirculante, obtenido por flujómetros, los cuales están conectados a las tuberías entregando el caudal instantáneo. Este flujo tiene asociado en cada momento la lectura de cuatro manómetros que entregan la caída de presión en un intervalo de la tubería, siendo posible obtener la pérdida de carga que produce el relave para cada variación de éste.

4.4.2 *Medición de las Condiciones de la Pulpa*

Las condiciones de la pulpa de relave pueden variar para cada una de las mediciones de caudal y presión manométrica. Por ello, el relave que fluye por las tuberías es muestreado en cada medición de los parámetros de recirculación, para determinar características como:

- Concentración de Sólidos
- Granulometría
- Temperatura
- pH
- Reología

Estos análisis son realizados por personal de ASMIN, directamente en la planta piloto que cuenta con laboratorios equipados según requerimientos de la prueba.

Las mediciones de concentración de sólidos se realizaron por el método de la probeta y por medición en base seca, las cuales se rigen bajo la norma ISO 9001. En el método de la probeta se determina la densidad del relave sabiendo el volumen de recipiente que lo contiene y su peso por medio de una balanza, y con este valor más la gravedad específica se determina el porcentaje de sólidos.

La medición en base seca se trata de pesar un cierto volumen de material e introducirlo al horno, luego se mide que porcentaje es el sólido que queda con respecto al volumen total antes medido.

a) Granulometría

La granulometría es obtenida una vez en cada combinación ensayada para corroborar que se cumplan las propuestas por el mandante, las cuales se exponen en la Tabla N°2.

Tabla N°2. Granulometría de las Muestras

Muestras	Diámetro de la tubería (mm)	% Sólidos	Granulometría	
			P80 (μm)	%-#325
M1	160	70	189	41
		65	177	42
	200	70	187	44
		65	176	43
M2	160	65	208	38
	200	65	210	40
M3	160	65	166	44
	200	65	163	39
Lamas	160	70	226	21
	200	70	227	21
Arena	160	55	59	67
	200	55	23	70

b) Reología

La medición de la reología se realiza con un viscosímetro rotacional HAAKE Viscotester 550, la cual se rige bajo la norma ISO 9001. El procedimiento utilizado para construir la curva reológica consiste en la medición de las tensiones de corte a distintas velocidades de deformación angular.

4.5 Cálculo del Número de Reynolds y Reynolds Crítico

Para cada una de las mediciones se procedió a calcular el Número de Reynolds correspondiente a fluido Plástico Bingham según la Ecuación 20.

Para establecer si el flujo corresponde a Laminar o Turbulento, el Número de Reynolds fue comparado con el Número de Reynolds Crítico propuesto por Slatter (2002) y Fuentes (2005), el cual corresponde a una modificación del propuesto por Hanks (1978). Todos estos criterios fueron desarrollados para flujos en tuberías. Estos criterios entregan una curva del tipo $Re_c = f(He)$, dependiente del Número de Hedström (ver Ecuación 20).

Los criterios de Fuentes y Slatter exhiben un mejor comportamiento para el caso de pulpas minerales, debido a que fueron desarrollados tomando en consideración una base de datos mucho más amplia. El criterio de Slatter sin duda es mucho más reciente y es más afín al caso de pulpas industriales. En base al criterio de Fuentes y Slatter, se proponen las etiquetas indicadas en la Tabla N°3.

Tabla N°3. Etiquetas según criterio de Fuentes y Slatter

Etiqueta	Criterio Etiqueta
L-L	$Re < Re_c (Slatter)$
L-T	$Re_c (Slatter) < Re < Re_c (Fuentes)$
T-T	$Re_c (Fuentes) < Re$

4.6 Análisis de los Factores de fricción

Como se vio con anterioridad, existen mediciones que según los criterios evaluados se encontrarían en régimen laminar, otras que se encontrarían en régimen turbulento o bien en transición. Todo esto debiera reflejarse al graficar los factores de fricción en el Ábaco de Moody. Sin embargo, al tratarse de un fluido modelado como plástico Bingham, éste no entrega la información suficiente, debido principalmente a la dependencia del Número de Hedström.

Para graficar los puntos obtenidos se utilizará el Número de Reynolds propuesto por Haldenwang (2002):

$$Re_2 = \frac{8 \cdot \rho \cdot V^2}{\tau_f + K \left(\frac{2 \cdot V}{R_H}\right)^n} \quad \text{Ecuación 31}$$

4.6.1 Análisis de los Regímenes de Flujo

a) Régimen Laminar

Una forma de evaluar que datos corresponden a régimen laminar es comparar los criterios de Fuentes y Slatter usando los factores de fricción teóricos mediante el Número de Reynolds propuesto por Haldenwang.

b) Régimen Turbulento y Transición

Para determinar el inicio del régimen turbulento completo no fue posible encontrar una expresión satisfactoria en la literatura. Haldenwang (2002) propone una expresión según la cual todos los puntos medidos corresponderían a un flujo turbulento. Por otra parte Abulnaga (2002) propone utilizar el criterio de Darby desarrollado para flujos en tuberías, para estimar los factores de fricción, según el cual la transición correspondería a una combinación de los factores de fricción, resultando en una suave transición. Ante la imposibilidad de utilizar un criterio absoluto derivado de la literatura, se utilizará el termino turbulento para las mediciones cuyo Número de Reynolds supere el Número de Reynolds crítico utilizado (Criterio de Slatter).

Al igual que el análisis realizado para los puntos en régimen laminar, se procederá a comparar los resultados entre los modelos teóricos usando las expresiones de Darby, Slatter y Colebrook & White.

4.7 Cálculo de las Pérdidas de Carga

4.7.1 Pérdidas de Carga Medidas

Para el cálculo de las pérdidas de carga arrojadas por el sistema de transporte de relaves fue necesario medir para cada caudal ensayado la caída de presión asociada mediante una serie de manómetros dispuestos en las dos tuberías utilizadas. Luego de obtener la diferencia entre el primer y último manómetro se calcula la pérdida de carga por unidad de longitud dividiéndola por la distancia entre el primer y último manómetro tal como se observa en la Ecuación 32:

$$J = \frac{\text{Manómetro}_1 - \text{Manómetro}_4}{L_{1-4}} \quad \text{Ecuación 32}$$

Siendo L_{1-4} igual a 23,71 m para la tubería de 160 mm de diámetro y 36,74 m para la tubería de 200 mm de diámetro.

4.7.2 Pérdidas de Carga Estimadas

Una vez calculados los factores de fricción para cada régimen se procede a calcular las pérdidas de carga mediante la siguiente expresión:

$$J = \frac{f_D}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 33}$$

4.8 Análisis de Sensibilidad

Los datos recabados en terreno presentan una gran variabilidad en cuanto a las características reológicas para un mismo tipo de muestra como para las muestras entre sí, lo que conlleva a que los resultados obtenidos no representen las características propias del material. Uno de los mecanismos utilizados para relacionar las muestras ensayadas en cuanto al grado de asociación que tienen sus variables es la prueba de hipótesis para dos muestras. Esta prueba consiste en comparar todas las muestras entre sí para una única variable, en este caso se comparara la viscosidad por un lado y el esfuerzo de corte por otro. Esta prueba estadística funciona basándose en dos hipótesis, la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La hipótesis nula sugiere que la variable comparada entre las dos muestras se debe considerar igual para ambas, en tanto

que la hipótesis alternativa sugiere que la variable comparada entre las dos muestras no presenta similitud.

Se comenzará con el supuesto de que los datos de las muestras presentan una distribución normal con un grado de confiabilidad (α) igual al 95%, que tiene asociado un $Z = 1,65$.

Para saber que hipótesis cumplen las dos muestras comparadas se debe obtener el valor de Z de la ecuación 34:

$$Z = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad \text{Ecuación 34}$$

En donde:

Z : Distribución normal de las dos muestras comparadas.

\bar{x} : Media de la muestra.

σ : Desviación estándar de la muestra.

n : Numero de datos de la muestra.

Obtenido el valor de Z se debe verificar lo siguiente:

- Si $Z \leq \alpha$; Las dos muestras cumplen con la hipótesis nula.
- Si $Z > \alpha$; Las dos muestras cumplen con la hipótesis alternativa.

Una vez agrupadas las muestras que presentan similitudes, se procedió a combinar datos de los distintos ensayos variando la viscosidad y esfuerzo de corte como se aprecia en la Tabla N° 4.

Tabla N°4. Combinaciones Usadas en Análisis de Sensibilidad

Variables	Grupos	Combinaciones de Datos				
Viscosidad (μ)	M2, M3, Lamas	μ	μ	μ	μ	μ
	M1, Arenas	Media	Media	Media	Mínimo	Máximo
Esfuerzo de Corte (τ)	M1,M2,Lamas	τ	τ	τ	τ	τ
	M3	Mínimo	Máximo	Medio	Medio	Medio
	Arenas					

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Factores de Fricción Experimentales

Utilizando Re_2 (calculado sin el análisis de sensibilidad de los datos) para graficar los factores de fricción obtenidos experimentalmente en el Ábaco de Moody, se aprecia en la Figura N°2 que los puntos están dentro de los tres regímenes: laminar, transición y turbulento, lo que hace que se pueda deducir a priori un buen comportamiento de este número adimensional para la pulpa caracterizada en esta investigación.

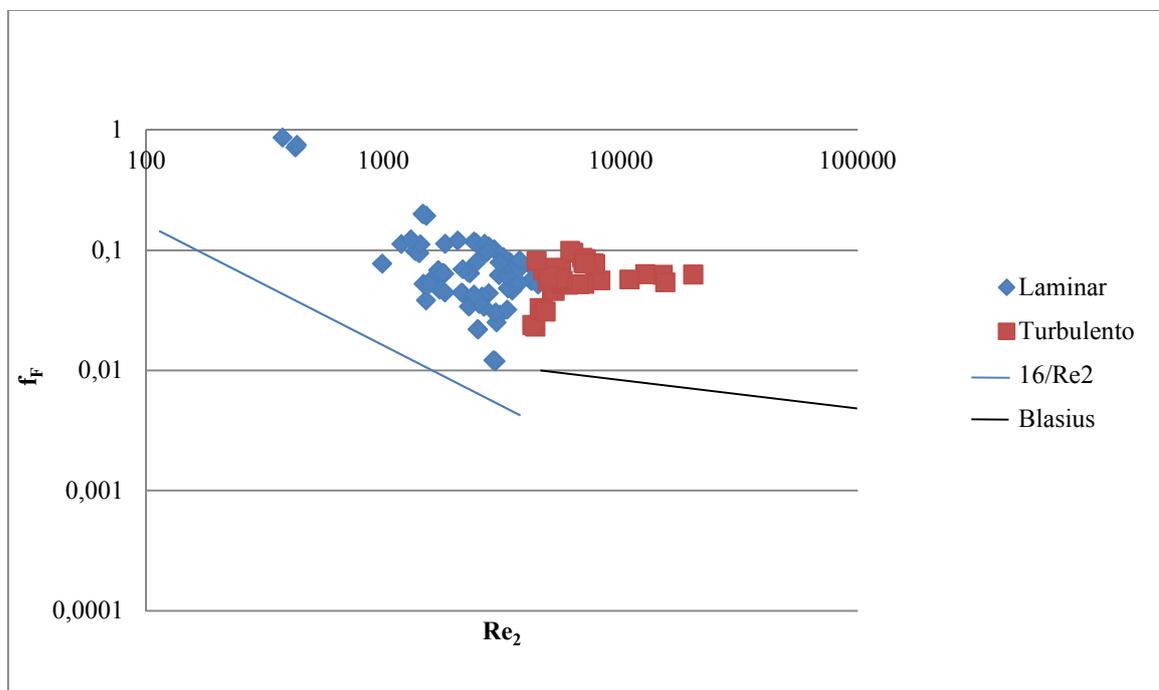


Figura N°2. Ábaco de Moody, mediciones utilizando Re_2

5.2 Análisis de los Regímenes de Flujo Estimados

Según los criterios propuestos en la Tabla N°3, existen mediciones en que el flujo es laminar, por lo tanto muchos de los modelos utilizados para estimar las pérdidas de carga en el transporte de relaves a priori no serían válidos, ya que consideran flujo turbulento. Una vez definido que datos corresponden a cada régimen se procede a determinar los factores de fricción mediante los modelos propuestos.

Los resultados obtenidos para los factores de fricción laminar (LL) y turbulento (TT) se aprecian en el siguiente Ábaco de Moody de la Figura N°3:

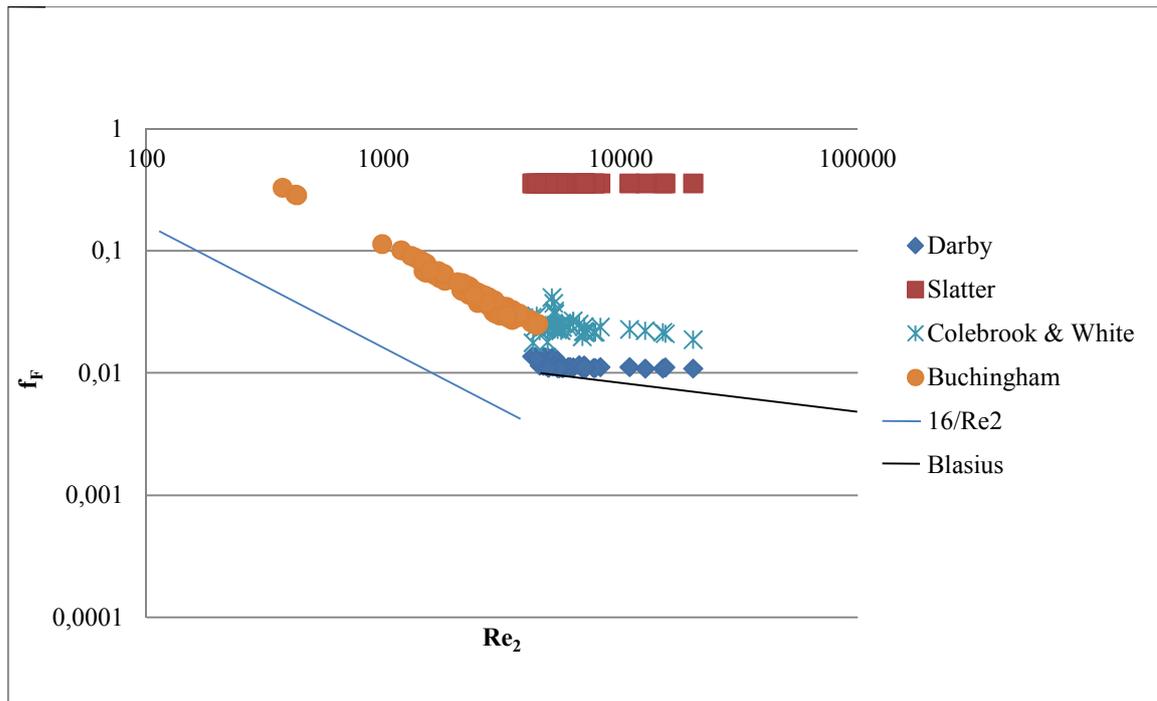


Figura N°3. Factores de fricción calculados (Moody Re_2)

En la Figura N°3 se aprecia que los valores obtenidos en la ecuación de Haldenwang ($16/Re_2$) y por Buckingham presentan la misma tendencia para el régimen laminar. Por otra parte, para los factores de fricción obtenidos en régimen turbulento se observan diferencias claras entre los modelos de Slatter con los modelos de Colebrook & White y Darby, que aunque presentan la misma tendencia, se encuentran bastante desfasados entre sí. Se advierte además que el modelo de Colebrook & White se presenta como una extensión de los datos obtenidos para el régimen laminar observándose una uniformidad en el paso de un régimen a otro.

5.3 Modelo de Predicción Elegido

Como se pudo observar en el punto 5.2 a través del Ábaco de Moody, los factores de fricción obtenidos mediante modelos teóricos presentan una variabilidad bastante grande en sus resultados, lo que fue influenciado en gran medida por el sistema mecánico en el que se realizó la prueba de bombeo (variación de temperatura, homogeneización de las muestras, decantación de partículas sólidas, velocidades límite, etc.). Para ajustar los datos y así lograr que sean más homogéneos y representativos para cada muestra de material, fue necesario realizar un análisis de sensibilidad a las variables más significativas en el cálculo de los factores de fricción, en nuestro caso el esfuerzo de corte (τ) y la viscosidad (μ). Según la prueba estadística utilizada y

de acuerdo a la combinación de datos propuestos en el punto 4.8, se determina trabajar con la viscosidad media y el esfuerzo de corte mínimo ya que presentan el mejor ajuste con los datos obtenidos teóricamente, comparados mediante el coeficiente de determinación (R²) como se aprecia en la Tabla N°5.

Tabla N°5. Coeficientes de determinación (R²)

Combinaciones		R ²		
μ	τ	Colebrook & White	Darby	Slatter
Media	Mínimo	0,675	0,437	0,539
Media	Máximo	0,204	0,040	0,083
Media	Medio	0,666	0,002	0,381
Mínima	Medio	0,669	0,125	0,417
Máxima	Medio	0,617	0,008	0,159

Se puede observar en la Tabla N°5 que el modelo de Colebrook & White es el que presenta un mejor ajuste con los datos obtenidos experimentalmente, además presenta una menor sensibilidad a la variación de las combinaciones de datos por lo que es más robusto en ese sentido.

En la Figura N°4 se representa gráficamente el modelo con mejor R² según la combinación elegida (modificación de esfuerzo de corte y viscosidad en los datos originales), obteniéndose las pérdidas de carga asociadas cuyos valores se comparan con las pérdidas de carga medidas experimentalmente.

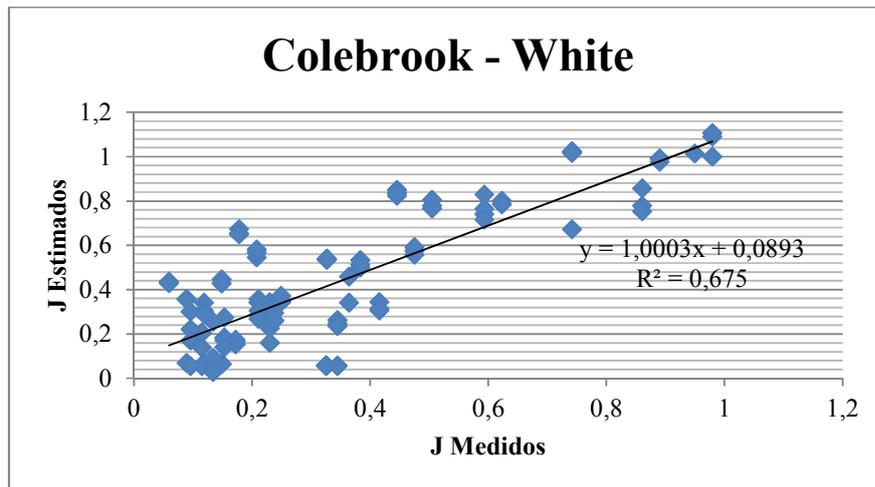


Figura N°4. Modelo de Predicción Elegido

Como se observa en la Figura N°4, el modelo de Colebrook & White poseen el coeficientes de determinación (R²) que mejor se ajusta a los datos experimentales, es por esto que se hará el análisis basado en este modelo.

5.4 Factores que inciden en las pérdidas de carga

Los datos experimentales obtenidos en esta experiencia dependen en gran medida de los factores que se fueron modificando en la prueba de bombeo ya sea la concentración de sólidos, diámetro de las tuberías y caudal de las muestras las que sin duda tienen un impacto en las pérdidas de carga calculadas. Se busca saber qué tan dependiente es la pérdida de carga de las variables mencionadas.

5.4.1 Diámetro

El diámetro es un factor influyente al momento de calcular las pérdidas de carga asociadas al transporte por tuberías, ya que las pérdidas de carga son inversamente proporcionales al aumento o disminución de éste.

En la Figura N°5 se presentan los diámetros ensayados versus las pérdidas de carga estimadas por tipo de muestra, según el modelo de predicción propuesto en el punto 5.3.

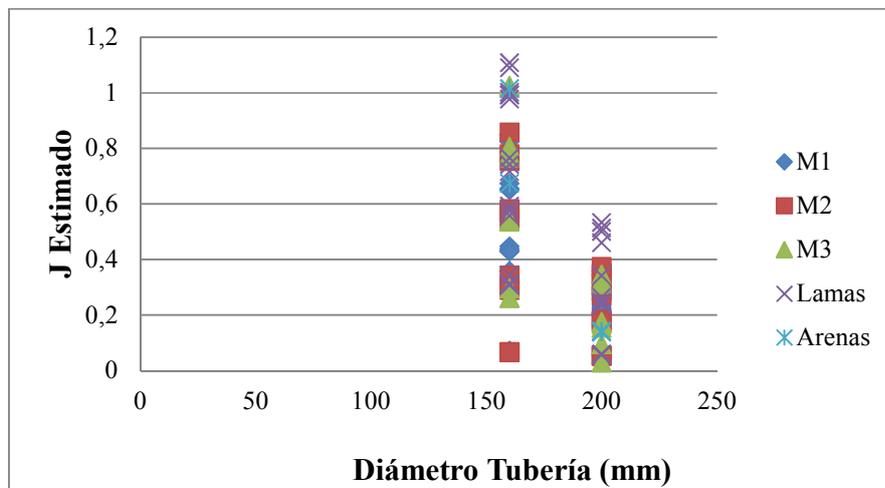


Figura N°5. Pérdidas de carga estimadas versus Diámetro de tubería

En la Figura N°5 se puede concluir que las pérdidas de carga son inversamente proporcionales a la variación del diámetro, sin embargo no se puede apreciar el efecto del tipo de muestra en esta variable.

5.4.2 Caudal

En la experiencia con relaves mineros, es muy relevante el rango de caudales en que puede funcionar la bomba que impulsa este material, por lo que se intentó buscar los máximos y mínimos caudales de funcionamiento para saber el intervalo de operación para cada muestra con cierto porcentaje de sólidos y pasando por un diámetro definido. El caudal mínimo corresponde al valor más cercano antes que la tubería se embancara y el valor máximo se obtuvo de acuerdo a las limitantes técnicas de la estructura y de los equipos electromecánicos.

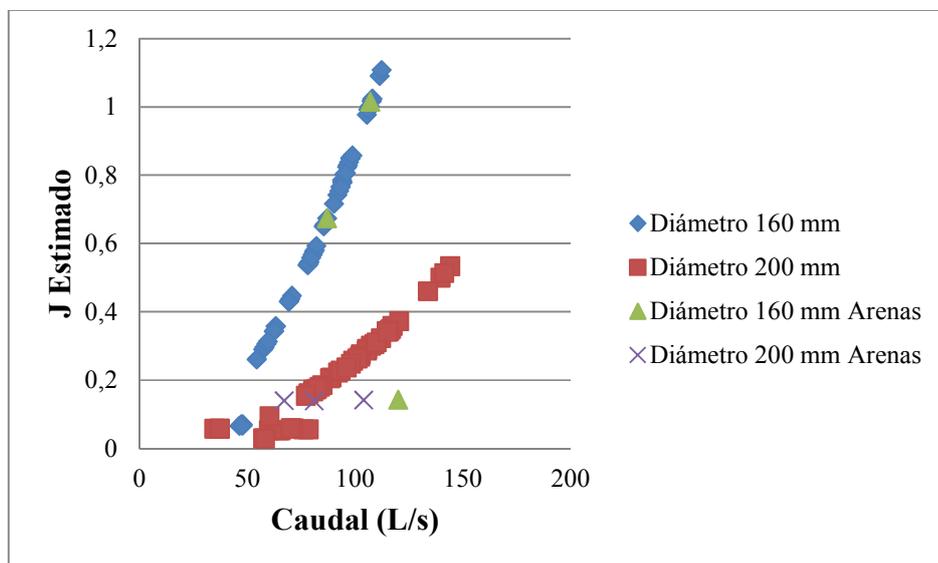


Figura N°6. Pérdidas de carga estimadas versus Caudal

En la Figura N°6 se puede apreciar que el aumento progresivo en el caudal ensayado es proporcional al aumento de las pérdidas de carga de las muestras. Adicional a esto se observa claramente dos líneas de tendencia lo cual está asociado al diámetro de las tuberías. La línea de tendencia que presenta las pérdidas más bajas corresponde al mayor diámetro, coincidiendo con la Figura N°5. Para el flujo correspondiente a arenas se puede apreciar claramente que para caudales bajos se produce distorsión en el flujo, siendo independiente al diámetro de las tuberías, afectando la calidad de las mediciones, lo cual ocurre para la mayoría de los datos con pérdidas de carga inferior a 0,2 correspondiente a flujo laminar, siendo más confiables los datos que están por sobre este valor.

5.4.3 Concentración de Sólidos

Uno de los objetivos principales de la planta piloto en la que se realizaron las pruebas era ver como se comportaban los relaves al aumentar el grado de espesamiento con respecto a la misma muestra en cuanto a su capacidad de transporte. En este caso sólo fue posible variar la concentración de la muestra M1 con la cual se realizó el análisis, debido a la efectividad de los espesadores.

En la Figura N°7 se observan las concentraciones ensayadas para la muestra M1 con sus respectivas pérdidas de carga estimadas:

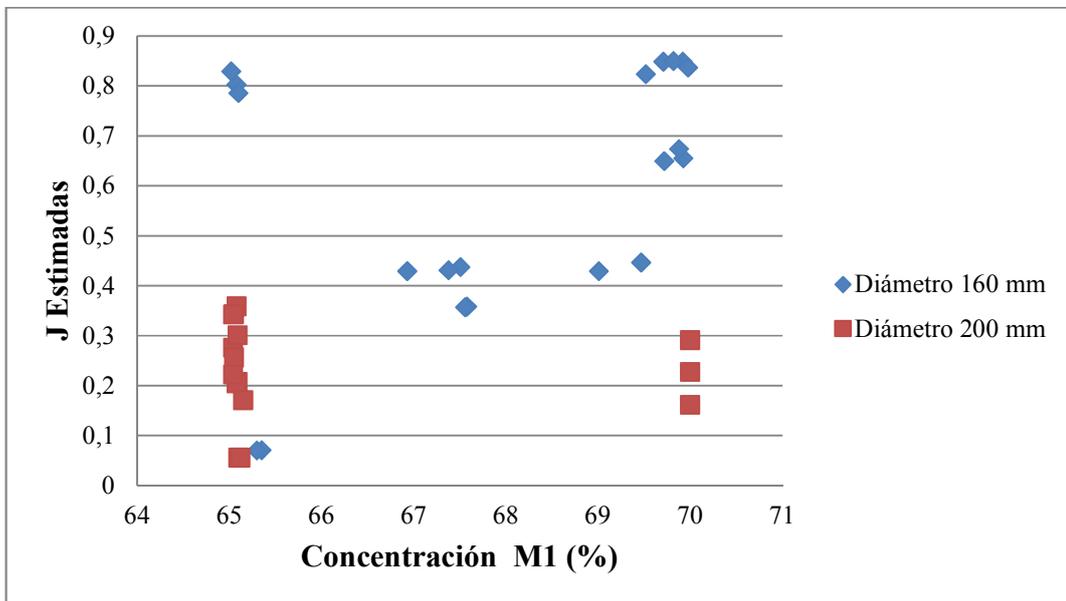


Figura N°7. Pérdidas de carga estimadas versus Concentración de Sólidos

Se aprecian en la Figura N°7 para la muestra M1 que las pérdidas de carga son independientes de la concentración del relave.

6 CONCLUSIONES

Planteados los objetivos de este documento y habiendo hecho el análisis correspondiente de los datos obtenidos, se está en condiciones de concluir lo siguiente:

1. Se caracterizaron las diferentes muestras ensayadas en cuanto a su composición, porcentaje de sólidos, diámetro de las partículas, información necesaria para entender alguno de los resultados expuestos.
2. Se identificó y cuantifico el impacto que tenían las variables en el cálculo de las pérdidas de carga para el modelo de predicción propuesto, determinado mediante su ajuste a los datos obtenidos experimentalmente, observándose claramente que para relaves de estas características las ecuaciones existentes deben ser modificadas.
3. La variación del diámetro de las tuberías para este tipo de fluido a los caudales ensayados tiene gran relevancia debido a las grandes diferencias obtenidas con respecto a las pérdidas de carga y al comportamiento del flujo (caudales bajos en diámetro mayor), siendo un factor importante al momento de diseñar sistemas de transporte de relaves espesados.
4. Las muestras M1, M2, M3 y Lamas, no desarrollaron alteraciones debido a su composición y granulometría individual que se consideren significativas, sin embargo la muestra correspondiente a arena presenta una alta sensibilidad a la variación de caudal para el diámetro mayor, obteniéndose lecturas que escapan a la tendencia que muestran los otros datos.
5. Los modelos expuestos en esta investigación fueron modificados para el trabajo con pulpas minerales, sin embargo trabajan bajo ciertos rangos de espesamiento, rango superado por el fluido ensayado en esta experiencia.

El modelo de pérdidas de carga que se ajustó de mejor forma a los datos fue el de Colebrook & White, aunque no muy bueno de acuerdo a los coeficientes de determinación calculados. Una forma de validar estas ecuaciones para fluidos de relaves espesados (validación que escapa a los objetivos de esta investigación) es aplicar un factor de corrección a los modelos utilizados con el fin de poder predecir las pérdidas de carga reales obtenidas en el loop de bombeo. Dicho factor de corrección será

independiente para cada tipo de material transportado y deberá incluir todas aquellas variables que están fuera de los rangos admisibles para dicho modelo.

Otras Conclusiones:

1. Respecto al sistema mecánico utilizado para realizar el experimento:

- El loop de bombeo es un sistema mecánico en desarrollo, propenso a errores humanos y con muchos ajustes que realizar aun a sus instalaciones, siendo causal de mediciones poco precisas en algunas ocasiones.
- El transporte de fluidos con sólidos en suspensión como es el caso de los relaves espesados debe asegurar velocidades de flujo que mantengan la turbulencia en su desplazamiento, con el fin de evitar la sedimentación de los sólidos suspendidos. Si ocurre esto, se modifican las condiciones iniciales de la prueba, obteniéndose lecturas erróneas.

2. Respecto a los factores que inciden en las pérdidas de carga:

Los factores que tuvieron mayor impacto en los resultados obtenidos según el análisis realizado, fueron el diámetro de las tuberías y los caudales ensayados. Para fluidos con una gran cantidad de sólidos en suspensión como es el caso de los relaves espesados, el aumento del diámetro implica aumentar la velocidad del flujo dentro de la tubería para mantener la turbulencia y no provocar la sedimentación de las partículas del flujo, es por esto que el aumento en el diámetro es directamente proporcional al aumento en la velocidad de impulsión del flujo, estando esto limitado por las velocidades críticas por un lado y la potencia y tipo de bomba utilizada por otro lado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Abulnaga, B. (2002). "Slurry System Handbook", McGraw-Hill, New York.
2. Barbera, S. (2005). "Estudio Teórico Experimental de Perdidas de Carga en Ductos de Relaves", Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
3. Cook, R. "High Concentration Tailings Transportation System Optimization". <http://www.pcce.co.za>. Acceso el 15 de Enero de 2015.
4. Christiansen A., Vera R. (año). "Transporte Hidráulico de Sólidos III". Departamento de Capacitación, Universidad de Atacama, Chile.
5. Domínguez, B. Irrazabal, M. (1987) "Medición del Comportamiento Reológico de Mezclas Sólido- Líquido Usando un Viscosímetro Capilar Modificado". Anales del VIII Congreso Nacional de Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Volumen I, 31-46, Santiago, Chile.
6. Domínguez, B. et al. (1987). "Velocidad Límite de Depositación en Flujo de Mezclas Sólido-Líquido en Canales. Revista apuntes de Ingeniería, Santiago-Chile, N°23,123-132.
7. Fuentes, R. (2005). "Curso Teórico Practico Reología de Pulpas", CMDIC Centro Tecnológico Minero de Capacitación JRI, Iquique, Chile.
8. Darby R. (2001). "Chemical Engineering Fluid Mechanics", Second Edition, Revised and Expanded. <http://www.ebrary.com>. Acceso el 25 de Enero de 2015.
9. Slatter, P.T., Wasp, E.J. (2002). "The Bingham Plastic Rheological Model: Friend or Foe", Presented at 15th International Conference on Hydrotransport, Banff, Canada, Junio.
10. Haldenwang, R. (2003). "Flow of non-Newtonian Fluids in Open Channels". Unpublished D. Tech thesis. Cape Technikon, Cape Town.
11. Slatter, P.T. (2004). "The hydraulic transportation of thickened sludges", Water Research Commission, Water SA Journal, Volumen 30 N°5 Special Edition (WISA). <http://www.wrc.org.za>. Acceso el 26 de Enero de 2005.
12. Wasp, E., Kenny, J., Gandhi, R. (1977). "Solid Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation". Series on Bulck Material Handling, Trans Tech Publications. Volumen 1 N°4, 77.