



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
Universidad del Perú. Decana de América  
Facultad de Ciencias Físicas  
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Diseño de una tubería de descarga de un cortador  
primario para pulpa en la mina Chinalco**

**INFORME PROFESIONAL**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

**AUTOR**

Eloy RODRÍGUEZ HUARNIZ

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Rodríguez, E. (2022). *Diseño de una tubería de descarga de un cortador primario para pulpa en la mina Chinalco*. [Informe profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	Eloy Rodríguez Huarniz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47374640
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0003-2874-9788">https://orcid.org/0000-0003-2874-9788</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número de documento de identidad	
URL de ORCID	
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	MIGUEL ANGEL ORMEÑO VALERIANO
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06532600
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	HENRY MANUEL PALA REYES
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	1586079
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	WILLIAM WILFREDO CHAUCA NOLASCO
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07143723

<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	A.2.5.1. Energética
Grupo de investigación	
Agencia de financiamiento	PROPIA
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Junín Provincia: Yauli Distrito: Morococha Latitud: -11° 40' 18" Longitud: -76° 8' 27"
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2019
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería mecánica <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01</a>



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DEL INFORME PROFESIONAL PARA OPTAR EL  
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS, MODALIDAD DE  
TITULACIÓN M-4 - POR EXPERIENCIA PROFESIONAL**

Siendo las 15:00 horas del día martes 27 de diciembre de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Dr. Ing. MIGUEL ANGEL ORMEÑO VALERIANO y con la asistencia de los miembros Mg. Ing. HENRY MANUEL PALA REYES y el Ing. WILLIAM WILFREDO CHAUCA NOLASCO, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación del Informe Profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-4 Por Experiencia Profesional, del Bachiller:

**ELOY RODRÍGUEZ HUARNIZ**

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó al Bachiller ELOY RODRÍGUEZ HUARNIZ, a realizar la Exposición del Informe Profesional titulado “DISEÑO DE UNA TUBERÍA DE DESCARGA DE UN CORTADOR PRIMARIO PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO”.

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la sala de sesión para dar lectura a la calificación final obtenida por el Bachiller, la misma que fue:

*Quince 15.*

El Presidente del Jurado Dr. Ing. MIGUEL ANGEL ORMEÑO VALERIANO, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller ELOY RODRÍGUEZ HUARNIZ Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las **15:48** horas del mismo día, se levantó la sesión.

**Dr. Ing. MIGUEL ANGEL ORMEÑO VALERIANO**  
PRESIDENTE DEL JURADO

**Mg. Ing. HENRY MANUEL PALA REYES**  
MIEMBRO DEL JURADO

**Ing. WILLIAM WILFREDO CHAUCA NOLASCO**  
MIEMBRO DEL JURADO



**UNMSM**

Firmado digitalmente por LOZANO  
BARTRA Whualkuer Enrique FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 29.12.2022 19:34:49 -05:00

**DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA**  
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://us06web.zoom.us/j/87013819222?pwd=Y1RCUhd3L3RmcUJBQTYvTFhK1RvUT09>

ID de reunión: 870 1381 9222

Código de acceso: 345939

Grabación archivada en el siguiente enlace:

[https://drive.google.com/file/d/1nj4Jv3n0oX6gk1bsDaqs4231eMkV1E6Y/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1nj4Jv3n0oX6gk1bsDaqs4231eMkV1E6Y/view?usp=share_link)

## Anexo 1

### Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado  
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad  
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica  
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes  
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)  
"DISEÑO DE UNA TUBERÍA DE DESCARGA DE UN CORTADOR PRIMARIO PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO"
7. Autor del documento (2)  
ELOY RODRÍGUEZ HUARNIZ
8. Fecha de recepción del documento 8/12/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 8/12/22
10. Software utilizado
  - Turnitin (X)
  - Ithenticate
  - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
  - Excluye textos entrecomillados
  - Incluye Bibliografía
  - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes<sup>3</sup>  
4%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas<sup>4</sup>  
Ver Anexo
14. Observaciones  
Ninguna
15. Calificación de originalidad
  - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
  - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
  - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 28 /12 /22



Firmado digitalmente por SARANGO  
JULCA Douglas Donal FAU  
20148092262 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 13.07.2022 19:58:40 -05:00

**DR. ING. Douglas Sarango Julca**

DIRECTOR ( e ) DE LA EPIMF

---

1 Otro (especificar) Informe Profesional Modalidad de Titulación M-4

2 Apellidos y Nombres completos

3 En letras y números

4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje

**DEDICATORIA**

*A mi padre, el señor EMILIO RODRIGUEZ  
CASTRO, y a mi madre, la señora MARÍA  
HUARNIZ VASQUEZ, como señal de  
agradecimiento por todo su apoyo y amor  
hacia mi persona.*



## **AGRADECIMIENTOS**

A la plana docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por guiarme en el sendero académico universitario de inicio a fin.

**ÍNDICE DE CONTENIDO**

1	Capítulo I-Condiciones Generales .....	10
1.1	Introducción .....	10
1.2	Antecedentes .....	13
1.3	Objetivos .....	14
1.3.1	Objetivo General.....	14
1.3.2	Objetivos Específicos.....	14
1.4	Motivación .....	14
1.5	Limitaciones del Tema.....	15
1.6	Códigos y normas de Diseño.....	16
1.7	Definiciones y Abreviaciones .....	17
2	Capítulo II-Principios Teóricos.....	19
2.1.	Sistema de unidades. ....	19
2.2.	Velocidad y caudal .....	21
2.3.	Esfuerzo cortante de líquidos en tuberías.....	21
2.4.	Número de Reynolds .....	22
2.5.	Factor de fricción en flujo laminar.....	23
2.6.	Factor de fricción en flujo turbulento.....	24
2.7.	Fórmula de Hazen Williams.....	26
2.8.	Pérdida por fricción de tuberías. ....	27

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

2.9.	Pérdida por fricción en accesorios. ....	28
2.10.	Ecuación de Bernoulli. ....	28
2.11.	Mecánica de Fluidos para fluidos No Newtoniano .....	29
2.12.	Fluido No Newtoniano. ....	29
2.13.	Propiedades de los fluidos no newtonianos.....	30
2.13.1.	Fluido homogéneo.....	30
2.13.2.	Fluido heterogéneo.....	31
2.13.3.	Velocidad de sedimentación ( <i>VL</i> ).....	31
2.13.4.	Densidad en un fluido no newtoniano.....	34
2.13.5.	Viscosidad absoluta para fluidos mixtos de concentración volumétrica menor a 1% .....	35
2.13.6.	Viscosidad absoluta para fluidos mixtos de concentración volumétrica mayor a 20% .....	35
2.13.7.	Viscosidad absoluta para fluidos mixtos de alta concentración volumétrica .....	36
2.13.8.	Calor específico.....	36
2.14.	Plástico Bingham.....	37
2.15.	Factor de fricción en flujo laminar para plástico Bingham .....	39
2.16.	Factor de fricción en flujo turbulento para plástico Bingham .....	39
3	Capítulo III-Descripción del problema .....	40
4	Capítulo IV-Bases y Criterio de Diseño .....	41

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

4.1.	Condiciones del sitio .....	41
4.2.	Propiedades del fluido agua .....	41
4.3.	Propiedades del sólido.....	42
4.4.	Propiedades de la pulpa.....	42
4.5.	Requerimiento del sistema .....	43
5	Capítulo V-Cálculos y análisis hidráulicos.....	44
6	Conclusiones .....	56
7	Recomendaciones .....	57
8	Bibliografía .....	58
9	Anexos. ....	60

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1:</b> Ubicación geográfica de la Mina Chinalco.....	11
<b>Figura 2:</b> Campamento minero de Chinalco.....	11
<b>Figura 3:</b> Esfuerzo cortante y presión del fluido en una tubería.....	21
<b>Figura 4:</b> Distribución de la velocidad lineal debido al movimiento de 2 placas.....	23
<b>Figura 5:</b> Gráfica de McElvain y Cave. ....	32
<b>Figura 6:</b> Esquema de la tubería de descarga HDPE DN 2 SDR11.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> SI magnitudes básicas.....	19
<b>Tabla 2:</b> SI magnitudes derivadas.....	20
<b>Tabla 3 :</b> Rugosidad absoluta de material nuevo usado en transporte de fluido no newtonianos.....	25
<b>Tabla 4:</b> Valores de rugosidad para tuberías nuevas de acero al carbono.....	25
<b>Tabla 5:</b> Coeficientes de rugosidad Hazen-Williams.....	27
<b>Tabla 6:</b> Velocidad de hundimiento de partículas.....	33
<b>Tabla 7:</b> Ejemplos de pipelines para fluidos no newtonianos a partir de 1957.....	37
<b>Tabla 8:</b> Ejemplo de fluidos Bingham.....	38
<b>Tabla 9:</b> Condiciones del sitio para el sistema.....	41
<b>Tabla 10:</b> Propiedades del fluido líquido agua.....	41
<b>Tabla 11:</b> Propiedades de los sólidos.....	42
<b>Tabla 12:</b> Propiedades de la pulpa.....	42
<b>Tabla 13:</b> Requerimiento del sistema.....	43
<b>Tabla 14:</b> Resultados de velocidades de fluido para DN 10".....	45
<b>Tabla 15:</b> Resultados de velocidades de fluido para DN 8".....	46
<b>Tabla 16:</b> Resultados de velocidades de fluido para DN 6".....	47
<b>Tabla 17:</b> Resultados de velocidades de fluido para DN 4".....	48
<b>Tabla 18:</b> Resultados de velocidades de fluido para DN 2".....	50
<b>Tabla 19:</b> Valores de número de Reynolds para caudales respectivos.....	51
<b>Tabla 20:</b> Valores de factor de fricción para caudales respectivos.....	53
<b>Tabla 21:</b> Valores de pérdidas primarias para los caudales respectivos.....	55

**ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>Anexo 1:</b> Flowsheet del sistema. Tubería de descarga.....	60
<b>Anexo 2:</b> Caja del cortador primario .....	61
<b>Anexo 3:</b> Cortador primario de donde inicia la tubería de descarga. ....	62
<b>Anexo 4:</b> Descarga de la tubería HDPE DN 2 SDR11.....	63
<b>Anexo 5:</b> Esquema general para la tubería de descarga. ....	64
<b>Anexo 6:</b> Vista isométrica de la tubería de descarga HDPE DN 2 SDR11.....	65

**Palabras claves:** Tubería, Slurry, relaves, fluido, cortador.

## Capítulo I-Condicionales Generales

### 1.1 Introducción

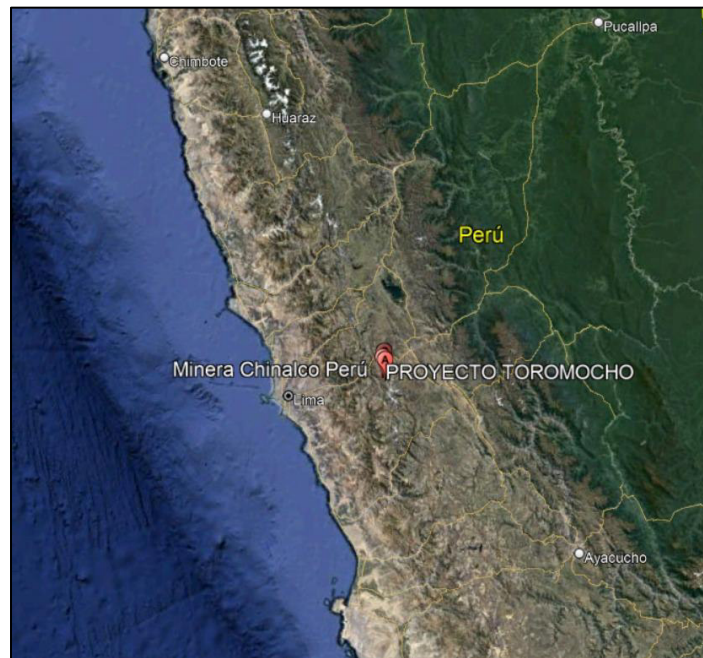
Uno de los principales minerales utilizado en la industria a nivel mundial es el Cobre, el cual tenemos a Chile (Mina Chuquicamata, Escondida, El Teniente, entre otras) como el máximo país en productor de dicho mineral. En segundo lugar, se encuentra Perú (Quellaveco, Antamina, Chinalco, entre otros). Cabe resaltar que China es el país que más consume cobre en el mundo.

En el Perú se encuentra La Minera Chinalco Perú S.A., operada por Aluminum Corporation of China. Es una empresa transnacional China donde el Aluminio es su principal mineral de producción, pero en Perú a partir de 2007 empezaron a producir concentrado de cobre a 157,000 toneladas por día y 300,000 de cobre refinado por año. La Minera Chinalco se encuentra en la sierra central del Perú en la región Junín, provincia Yauli, distrito Morococha en UTM E: 375215 N:8709766. Otros metales que produce la Minera Chinalco es el Aluminio y Molibdeno.



## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

**Figura 1:** *Ubicación geográfica de la Mina Chinalco.*



Nota: Ubicación geográfica de la Mina Chinalco. Fuente: Google Earth.

**Figura 2:** *Campamento minero de Chinalco.*



Nota: Campamento de la Minera Chinalco. Fuente: Google Earth.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

Para el proceso de la extracción de Cobre se lleva a cabo una secuencia el cual inicia con el estudio de los previos del geólogo que detectan dicho metal, pero con presencia de varios materiales más. Luego se inicia con la perforación y voladura para luego dirigirlo al área de Chancado y Trituración para obtener partículas entre  $\frac{1}{4}$ " y  $\frac{3}{8}$ " de diámetro. Posterior a ello, las partículas son dirigidas mediante fajas transportadores hacia el área de Molienda en donde los molinos de bola con efectos de abrasión e impacto preparan las partículas para dirigirlos al área de flotación en donde se aplica la refinación electrolítica que mediante corriente eléctrica produce concentrado de cobre de alta pureza. Es en esta área en donde obtenemos la pulpa (Fluido No newtoniano) el cual es estudiado periódicamente a través de un cortador que extrae una muestra de pulpa de la línea de transporte para evaluar el porcentaje de sólidos que contiene el fluido. El cortador tiene una tubería de descarga el cual lleva el fluido hacia un muestreador en donde se lleva a cabo el estudio de la pulpa. Luego del muestreador el fluido es impulsado mediante una bomba vertical se dirige hacia la tolva en donde vuelve a la línea principal.

El informe profesional a realizar se obtiene los cálculos hidráulicos de la tubería de descarga del cortador hacia el muestreador. Los cálculos estarán basados en ecuaciones fundamentales de fluido No Newtoniano ya que estamos considerando como transporte una pulpa el cual contiene cierto porcentaje de líquido y de sólidos.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

### 1.2 Antecedentes

Martínez Melo, Olga (2000), realizó una tesis de “Diseño, operación y mantenimiento de las presas de relave” de la Universidad Nacional de Ingeniería. En ella describe sobre el proceso de los relaves obtenidos en el proceso de extracción de minerales que son transportados y depositados en forma de lodo (fluido no newtoniano) en presas de relaves que son construidas regidas a los diferentes aspectos legales del estado peruano. También nos explica sobre los parámetros de diseño como la ubicación, la topografía, geología del cuerpo minado, características de la pulpa (relave), entre otros. La tesis es totalmente teórica, es decir se puede utilizar para un diseño de pre factibilidad de ingeniería de presas para relaves.

Parra Murrugarra, Denys Amador (2015) de la Universidad Nacional de Ingeniería, elaboró una tesis de “Diseño de depósitos de relaves filtrados”. En ella comenta sobre la definición de todo proceso de diseño de un depósito de relaves filtrados. En ella explica sobre la estabilidad de los depósitos de relaves y la durabilidad que deben de poseer, para ello accede a datos de estudios sísmicos para realizar una proyección de la estructura a construir.

Cabrera, Catalina (1992), de la Universidad de Cuenca. Realizó el estudio de cálculo de diámetro de tubería utilizando el método de iteraciones, elige un diámetro y éste luego es introducido a las ecuaciones de Bernoulli y Colebrooke-White para luego de su evaluación y convergencia de los resultados. El método iterativo es un método numérico llamado Newton Rapson.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 *Objetivo General*

El objetivo general del presente informe profesional es determinar mediante cálculos hidráulicos el diámetro óptimo de la tubería de descarga del cortador mencionado en la sección 1-1. Tener en consideración que utilizaremos variables para el diseño de diámetro para un fluido no newtoniano.

#### 1.3.2 *Objetivos Específicos*

- a. Mediante un proceso iterativo seleccionar el diámetro hidráulico óptimo para la tubería de descarga del cortador.
- b. Seleccionaremos en material de la tubería y su espesor para que cumpla los requerimientos hidráulicos del sistema.
- c. Evaluar los parámetros hidráulicos de la pulpa teniendo como objetivo evitar la sedimentación de los sólidos del fluido.

### 1.4 Motivación

En el pregrado de la universidad nos basamos en estudiar fluidos no newtonianos, tanto en el transporte en tuberías o canales. Pero también adquirimos conocimientos fundamentales del fluido no newtoniano, uno de ellos es la pulpa, la cual encontramos en el proceso de la minería para la extracción de diferentes tipos de metales o minerales.

Para realizar los cálculos hidráulicos y lograr el objetivo explicado en la sección 1.3 nos basaremos en ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos para fluidos no

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

newtonianos y a través de una hoja de cálculo reduciremos el tiempo de cálculo para las iteraciones que haremos hasta encontrar el diámetro óptimo.

En la actualidad los proyectos relacionados a la construcción tienen como sustento la ingeniería básica utilizando como soporte diferentes softwares de simulación de fluidos, por ejemplo, el Ansys o el Solidworks. Son herramientas tecnológicas necesarias para optimizar el tiempo de culminación del proyecto.

De igual manera los softwares están diseñados con algoritmos basados en ecuaciones de la mecánica de fluido que mediante una serie de proceso iterativos lograr resolver ecuaciones implícitas y con varias variables.

En el informe profesional que estamos desarrollando, contrasté mi experiencia laboral (relacionado al factor de seguridad) con mis conocimientos académicos adquiridos en la universidad.

### **1.5 Limitaciones del Tema**

El informe profesional a realizar contiene netamente cálculos hidráulicos y se obviará es aspecto económico concerniente al CAPEX y OPEX, también se obviará el aspecto social. El fluido no newtoniano a analizar se evaluará en régimen permanente (La cantidad de movimiento se mantiene estable a lo largo del tiempo).

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

### 1.6 Códigos y normas de Diseño

El sistema de impulsión de agua fresca ha sido diseñado bajo los siguientes códigos:

- 019GP0106A-3110-07-1904: Diagrama P&ID.
- CD-019GP0043A-0000-05-001: Criterio de diseño.
- ANSI/HI 9.6.7. Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pump Performance.
- ANSI/HI 12.1-12.6. Rotodynamic (Centrifugal) Slurry Pumps for Nomenclature, Definitions, Applications, and Operation.
- Engin T., Gur M. (2001). Performance Characteristics of a Centrifugal Pump Impeller with Running Tip Clearance Pumping Liquid-Solids Mixtures", ASME J Fluids Eng, 123, pp. 523-538.
- Engin T. (2007). Prediction of relative efficiency reduction of centrifugal slurry pumps: empirical and artificial-neural network-based methods, Proc. IMechE Vol. 221 Part S: J. Power and Energy, pp. 41-50.
- ASME B31.3-2008 .Process Piping..
- ASME B31.4-2009 Pipe Line Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids.
- ASME B31.9-2014. Building Services Piping.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

### 1.7 Definiciones y Abreviaciones

El presente documento, considera las siguientes definiciones y abreviaciones a ser utilizadas:

TDH Total Dynamic Hydraulic. Presión necesaria para impulsar el flujo.

ANSI American National Standard Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares).

ASME American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

ASTM American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para el Ensayo y Materiales).

BOP Bottom of Pipe (Nivel bajo la tubería)

CS Carbon Steel (Tubería de acero al carbono).

HDPE High Density Polyethylene (Polietileno de alta densidad).

HGL Hydraulic Grade Line (Línea de Gradiente Hidráulico).

PE Polyethylene (Polietileno de alta densidad).

hp Horse power (Caballos de fuerza).

km Kilómetros.

NPS Nominal Pipe Size (Diámetro nominal de tubería).

mm Milímetros.

msnm Metros Sobre Nivel del Mar.

mpy Mils per year (Milésimos de pulgadas por año).

Patm Presión atmosférica.

psi Pounds per square inch (Libras por pulgada cuadrada).

Pvap Presión de vapor.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

SI	Sistema Internacional de Unidades.
mca	Metros Columna de Agua.
wt	Wall thickness (Espesor de tubería).
$C_w$	Concentración de peso de sólidos.
$C_v$	Concentración de volumen de sólidos.
$d_{50}$	Diámetro de tamaño de partícula al 50% de peso en sólidos.
$Re$	Número de Reynolds.
$V_D$	Velocidad crítica de sedimentación.
$\mu$	Viscosidad dinámica.
$\rho$	Densidad.
$\nu$	Viscosidad cinemática.
$f_D$	Factor de fricción Darcy.
$f_N$	Factor de fricción Fanny.
$F_r$	Fuerza de fricción.
$g$	Aceleración de la gravedad.
$D_i$	Diámetro interior.



**Capítulo II-Principios Teóricos**

Analizaremos los conceptos básicos de la mecánica de fluidos, posterior a ello en la sección 2.10 desarrollaremos los conceptos de fluidos no newtonianos.

**2.1. Sistema de unidades.**

De la oficina central internacional de pesos y medidas, presentamos en la tabla 1 las magnitudes básicas del sistema internacional de unidades y la tabla 2 las magnitudes derivadas.

**Tabla 1:** *SI magnitudes básicas.*

<b>Magnitudes básicas</b>		<b>Unidades SI básicas</b>	
<b>Nombre de la magnitud</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nombre de la unidad</b>	<b>Unidad</b>
Unidad de longitud	l, x, r, etc.	metro	m
Unidad de masa	m	kilogramo	kg
Unidad de tiempo	t	segundo	s
Unidad de corriente eléctrica	I, i	amperio	A
Unidad de temperatura termodinámica	T	kelvin	K
Unidad de cantidad de sustancia	n	mol	mol
Unidad de intensidad luminosa	Iv	candela	cd
Área	A	metro cuadrado	m <sup>2</sup>

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

Volumen	V	metro cúbico	m <sup>3</sup>
Velocidad	v	metro por segundo	m/s
Aceleración	α	metro por segundo cuadrado	m/s <sup>2</sup>
Número de ondas	σ	metro a la potencia menos uno	m <sup>1</sup>
Densidad, masa en volumen	ρ	kilogramo por metro cúbico	kg/m <sup>3</sup>
Densidad superficial	ρA	kilogramo por metro cuadrado	kg/m <sup>2</sup>
Volumen específico	v	metro cúbico por kilogramo	kg/m <sup>3</sup>
Densidad corriente	j	amperio por metro cuadrado	A/m <sup>2</sup>

Nota: SI oficina internacional de pesas y medidas organización intergubernamental de la convección del metro 8va edición 2006.

**Tabla 2:** *SI magnitudes derivadas.*

Magnitud derivada	Nombre de la unidad	Símbolo	Unidad
Presión, tensión	newton	N	m kg s <sup>-2</sup>
Energía, trabajo	julio	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
Potencia	vatio	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
Temperatura Celcius	grado celcius	°C	K
Viscosidad dinámica	pascal segundo	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>

Nota: SI oficina internacional de pesas y medidas organización intergubernamental de la convección del metro 8va edición 2006.

## 2.2. Velocidad y caudal

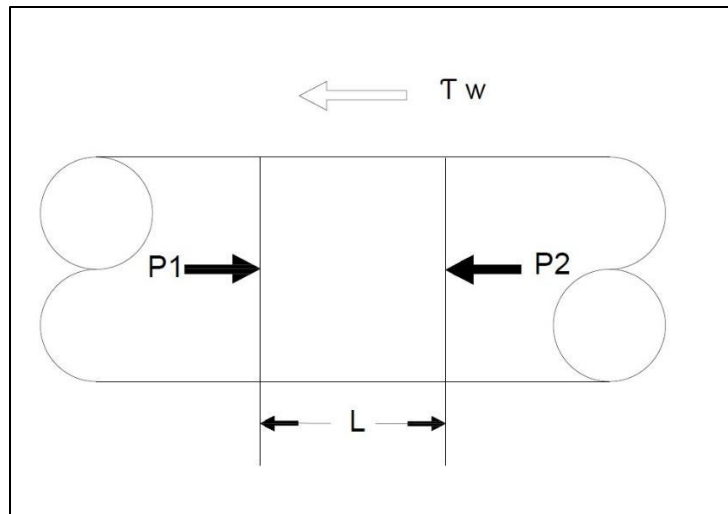
Existen 2 tipos de caudales, caudal volumétrico y caudal másico. El caudal es la cantidad de fluido que pasa por una sección transversal en un tiempo determinado.

$$Q = \frac{V}{t} = v \times A \quad \text{Ec. 1}$$

## 2.3. Esfuerzo cortante de líquidos en tuberías

Actualmente la mecánica de fluidos está basada en el control de volumen para el análisis del fluido. La cantidad de momento de masa y energía se conserva cuando ingresa y sale del control de volumen. Considerando que la sección transversal circular en una tubería es constante y tenemos los puntos 1 y 2 (Ver la figura 3) tenemos:

**Figura 3:** Esfuerzo cortante y presión del fluido en una tubería.



Nota: Elaboración propia.

$$F_{12} = \frac{\pi}{4} D_i (P_1 - P_2) \quad \text{Ec. 2}$$

La fuerza es balanceada por la fuerza de fricción  $F_r$

$$F_r = \tau_w \pi D_i L \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $L$  es la distancia entre el punto  $P_1$  y punto  $P_2$ . Y  $\tau_w$  es el esfuerzo de la pared de la tubería.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$\frac{\pi}{4} D_i^2 (P_1 - P_2) - \tau_w \pi DL = 0$$

O

$$\tau_w = \frac{D_i(P_1 - P_2)}{4L} = \frac{R_i (P_1 - P_2)}{2L} \quad \text{Ec. 4}$$

### 2.4. Número de Reynolds

Hager (en 1839) y Poiseville (en 1840) demostraron que bajos ciertas condiciones de fricción se generaba una función lineal con respecto a la velocidad del fluido. En 1858, Darcy bajo otras condiciones de fricción, ésta era proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido. Reynolds, había demostrado que Poiseville y Darcy estaban en lo correcto en el año 1883 pero la relación del factor de fricción era distinta cuando se evaluaban bajas velocidad y altas velocidades.

Reynolds demostró que bajo ciertas condiciones que la transición de flujo laminar hacia flujo turbulento está basada en una relación de inercia con la viscosidad.

$$Re = \frac{\text{Inercia}}{\text{Viscosidad}} = \frac{\rho U D_i}{\mu} = \frac{U D_i}{\nu} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del fluido.

$\mu$  = Viscosidad dinámica.

$\nu$  = Viscosidad cinemática.

$U$  = Promedio de velocidad del fluido.

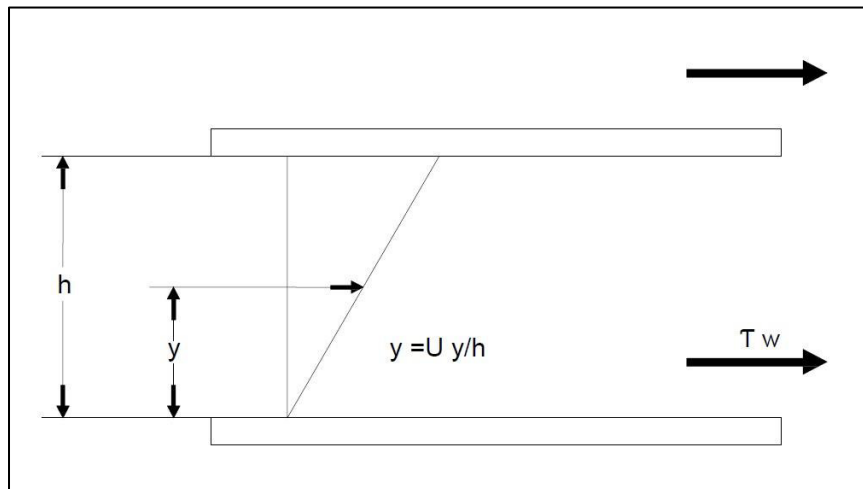
La viscosidad cinemática es la viscosidad dinámica dividida por la densidad del fluido ( $\frac{m^2}{s}$ ). Otra de las unidades utilizadas es el centistokes que es la obtenida de dividir la viscosidad dinámica entre la gravedad específica del fluido. Un centipoise es el equivalente a una mili Pascal-segundo.

## 2.5. Factor de fricción en flujo laminar

Basándonos en la teoría de la capa límite vemos en la figura 4 el comportamiento del flujo laminar ( $Re < 2000$ ). Los fluidos adheridos a las placas tienen la misma velocidad que el de las placas. Hagen-Poiseville describieron la ecuación para flujo laminar (Eq. 6).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{32 \mu U}{D_i^2} \quad \text{Ec. 6}$$

**Figura 4:** Distribución de la velocidad lineal debido al movimiento de 2 placas.



Nota: Elaboración propia.

Haciendo un arreglo en la ecuación 5 tenemos:

$$\mu = \left(\frac{\Delta P}{L}\right) \left(\frac{D_i^2}{32U}\right) = \left(\frac{D_i \Delta P}{4L}\right) \left(\frac{D_i}{8U}\right)$$

$$\mu = \frac{\tau_w}{8U/D_i} \quad \text{Ec. 7}$$

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

Sabiendo la ecuación del factor de fricción de Fanny que es un número adimensional definido por la relación de las fuerzas cortantes y presión dinámica del fluido ecuación 8

$$f_N = \frac{\Delta P D_I}{4L} / \left(\frac{\rho U^2}{2}\right) \quad \text{Ec. 8}$$

Hallamos el factor de fricción Fanny para un flujo laminar reemplazando la Ec. 6 en la Ec. 7:

$$f_N = \frac{16\mu}{\rho V D_I} = \frac{16}{Re} \quad \text{Ec. 9}$$

La relación del coeficiente de fricción Fanny y el coeficiente de fricción de Darcy es la siguiente:

$$f_{Darcy} = 4 \times f_{Fanning}$$

### 2.6. Factor de fricción en flujo turbulento

En flujo turbulento ( $Re > 4000$ ) la rugosidad del material de la tubería tiene un papel fundamental para determinar el factor de fricción. La rugosidad  $\varepsilon$  es medido en unidades de longitud.

A continuación, mostraremos la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f_N}} = 4 \log_e \left(\frac{D_i}{2\varepsilon}\right) + 3.48 - 4 \log_e \left(1 + 9.35 \frac{D_i}{2\varepsilon Re \sqrt{f_N}}\right) \quad \text{Ec. 10}$$

Simplificando la ecuación en el factor de fricción de Darcy tenemos:

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f_N}} + \frac{\varepsilon}{3.7 D_I}\right) \quad \text{Ec. 11}$$

En la tabla 3 mostramos algunos valores de rugosidad de algunos materiales usado para la fabricación de tuberías de transporte de pulpas.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

**Tabla 3 :** *Rugosidad absoluta de material nuevo usado en transporte de fluido no newtonianos.*

<b>Descripción</b>	<b>Rugosidad (m)</b>	<b>Rugosidad <math>\epsilon</math> (ft)</b>
Tuberías de plástico, PVC, HDPE	$1.5 \times 10^{-6}$	0.000004921
Tuberías de acero	$6.0 \times 10^{-5}$	0.000197
Tuberías de caucho	0.00015	0.000492
Tuberías de concreto	0.0012	0.00394

Nota: Slurry systems Handbook. Baha Abulnaga 2002.

**Tabla 4:** *Valores de rugosidad para tuberías nuevas de acero al carbono.*

<b>Denominación inch</b>	<b>Diámetro</b>		<b>Presión psi permitida a 650 °F</b>	<b>Rugosidad relativa para tubería nueva</b>
	<b>exterior inch</b>	<b>Espesor</b>		
2" Sch 40	2.375	0.154	1159	0.001143
3" Sch 40	3.5	0.216	1341	0.00077
4" Sch 40	4.5	0.237	1191	0.000587
5" Sch 40	5.633	0.257	1071	0.000461
6" Sch 40	6.625	0.28	1000	0.000389
8" Sch 40	8.625	0.322	916	0.000296
10" Sch 40S	10.75	0.365	856	0.00236

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

14" Sch 40	14	0.4	956	0.000182
16" Sch 40X	16	0.5	834	0.000157
18" Sch 40	18	0.562	847	0.00014
20" Sch 40	20	0.594	811	0.000126
24" Sch 40	24	0.688	795	0.000104
30" Sch30	30	0.625	568	0.0000822
36" Sch 40	36	0.75	580	0.0000685

Nota: Slurry systems Handbook. Baha Abulnaga 2002.

### 2.7. Fórmula de Hazen Williams

En EEUU la fórmula de Hazen Williams es usado generalmente en el área de ingeniería civil porque no interviene el número de Reynolds.

La velocidad es calculada por:

$$U = 1.319CR_H^{0.63}S^{0.54} \text{ ft/s} \quad \text{Ec. 12}$$

$$S = \frac{H_v}{L} = \frac{Q_{gpm}^{1.85}}{1.67 \times C^{1.85} \times R_H^{1.17}} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde  $Q_{gpm}$  es el caudal expresado en galones por minuto.

$S$  = Pendiente de pérdida de energía por unidad de longitud.

$U$  = Promedio de velocidad en pies por segundo.

$R_H$  = Radio hidráulico.

$C$  = Coeficiente de rugosidad.

A continuación, en la tabla 5 mostraremos algunos coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams.



**Tabla 5:** *Coefficientes de rugosidad Hazen-Williams*

Descripción	Coeficiente de rugosidad Hazen-Williams
Tubería extremadamente lisa	140
Tubería muy lisa	130
Tubería de concreto	120
Tubería remachada	110
Tubería fundida de 10 años	100
Tubería muy áspera	60

Nota: Valores de coeficiente de rugosidad para conductos nuevos y limpios. Fuente: Mecánica de Fluidos aplicada 4ta edición, Robert L. Mott (1996).

## 2.8. Pérdida por fricción de tuberías.

En la ecuación 8 y la ecuación 10 se estableció la relación entre el valor del factor de fricción y el número de Reynolds. La pérdida por fricción es expresada en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{f_D V^2 L}{2g D_I} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$H$  : Pérdida por fricción en metros para el SI.

$L$  : Longitud de la tubería en metros para el SI.

$f_D$  : Factor de fricción Darcy.

$D_I$  : Diámetro interior de la tubería.

$V$  : Velocidad del fluido en metros por segundos o pies por segundos.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$g$  : Aceleración de la gravedad

### 2.9. Pérdida por fricción en accesorios.

También es conocido como pérdidas por fricción secundarias. Es la pérdida de energía que obtiene el fluido al ser interrumpido la trayectoria del flujo por accesorios, ya sea codos, tees, bridas, reducciones, etc.

Podemos complementar la ec. 14 y las pérdidas primarias en la ec. 15:

$$H_f = f_D \frac{\rho U^2 L_j}{2 D_{ij}} + \sum K_f \frac{\rho U^2}{2} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$L_j$  = Longitud del conducto j.

$K_f$  = Coeficiente de pérdida de accesorios.

### 2.10. Ecuación de Bernoulli.

Presentaremos el comportamiento de una línea de fluido desde el punto 1 hasta el punto 2 añadiendo la energía de una bomba en la ecuación.

$$(E_p + E_v + E_z)_1 + E_A = (E_p + E_v + E_z)_2 + E_E + E_f + E_m$$
$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{U_1^2}{2} + Z_1 g + E_A = \frac{P_2}{\rho} + \frac{U_2^2}{2} + Z_2 + E_E + E_f + E_m \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$E_p = P_1/\rho$ : Energía debido a la presión estática por unidad de masa.

$U_1^2/2$ = Energía debido a la presión dinámica por unidad de masa.

### **2.11. Mecánica de Fluidos para fluidos No Newtoniano**

Es el estudio de los fluidos tanto en reposo como en movimiento. Fue planteado por el francés Navier-Stokes (1822-1863) en ecuaciones de derivadas parciales. La mecánica de fluidos está dividida en 2 estados: Líquido y gaseoso. En el líquido tenemos el agua, el aceite, los relaves, el aceite, etc. En el gaseoso tenemos el aire, dióxido de carbono, monóxido, vapores, etc.

Diversas variables de magnitudes físicas intervienen en el análisis de la mecánica de fluido. En las principales magnitudes físicas tenemos la viscosidad, densidad, presión, caudal, velocidad, potencia. En el presente informe profesional analizaremos un fluido no newtoniano que es aquel en donde la viscosidad es inversamente proporcional a la fuerza normal que se aplica en ella. Por ejemplo, tenemos las pulpas, relaves, el lodo, etc. Este fluido está compuesto por un porcentaje de líquido y un porcentaje de sólidas.

### **2.12. Fluido No Newtoniano.**

Esencialmente está compuesto por una mezcla de sólidos y líquidos. Las características físicas dependen de diversos factores como el tamaño y la distribución de partículas, concentración de sólidos, tamaño del ducto por el cual es transportado, nivel de turbulencia, temperatura y viscosidad que lleva.

La ciencia de los fluidos no newtonianos tiene su inicio en 1950 con un simple test de bombeo de líquido, arena y carbón en moderadas concentraciones. Fue abarcando importancia gradualmente en la industria al tratar de bombear mixturas de líquidos, carbón y aceites en la minería. La ingeniería de fluidos no newtonianos requiere varios modelos empíricos y matemáticos. En esos años, el diseño de tuberías para transporte de fluidos no newtoniano se volvería complejo.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

El dragado es el proceso más común para procesar el fluido no newtoniano. En el dragado encontramos cierto rango de tamaño de partículas de sólidos de rocas, minerales, metales, etc. En los años 50s con la fiebre del oro en California se necesitaba transportar dicho mineral largas distancias, es por ello que se necesitaba diseñar sistemas de tuberías de largo alcance.

### **2.13. Propiedades de los fluidos no newtonianos.**

El fluido no newtoniano es esencialmente una mezcla de líquido y partículas de sólidos. El fluido en una línea de tubería de gran alcance es diferente al fluido no newtoniano en su fase líquido simple. Teóricamente en la fase líquido simple la viscosidad absoluta es baja y la velocidad puede ser baja para la transición de flujo laminar a flujo turbulento. Sin embargo, en la fase mixta se debe de superar la velocidad crítica de deposición. Análogamente se puede comparar con el comportamiento de un avión, si la velocidad baja considerablemente, éste deja de sustentarse en el aire. Es decir, en un fluido no newtoniano si la velocidad no es suficientemente alta, las partículas de los sólidos contenidos en el fluido empiezan a sedimentar por el ello todo el fluido dejaría de fluir ya que las partículas no se mantendrían en suspensión.

#### ***2.13.1. Fluido homogéneo***

Es cuando las partículas de sólidos están uniformemente distribuidas a través del líquido. Un ejemplo de fluido homogéneo es la pulpa de concentrado de cobre después de haber pasado por el proceso de molienda. Las partículas son bien finas y el porcentaje de su concentración es alto, aproximadamente entre 50% y 60% del fluido en total. El

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

tamaño típico de partículas de flujo homogéneo es menor de  $40 \mu m$  a  $70 \mu m$ .

Dependiendo de la densidad de los sólidos.

### **2.13.2. Fluido heterogéneo**

En el fluido heterogéneo, la mezcla de sólidos con líquido no son uniformes con respecto al plano del ducto transportador del fluido. Una gradiente de concentración se encuentra en el plano vertical. El porcentaje de concentración de partículas permanece bajo, aproximadamente menor al 25 %. El fluido heterogéneo lleva una mínima velocidad, por ejemplo en la mina Taconi en Minnessota, la típica velocidad de deposición excede en  $3.4 \frac{m}{s}$  a  $4.0 \frac{m}{s}$ . Es complejo el análisis de este fluido, en otros casos es denominado fluido pseudohomogéneo en donde las grandes fracciones de partículas son finas pero absorbidas por las partículas gruesa ocasionando que el valor de la velocidad se reduzca al mínimo.

### **2.13.3. Velocidad de sedimentación ( $V_L$ )**

La velocidad de sedimentación es la velocidad mínima que necesita la partícula para que permanezca en suspensión. Esta velocidad no es idéntica a la velocidad crítica del fluido. La velocidad crítica viene a ser 17 veces la velocidad de sedimentación, se realizaron varios estudios para encontrar una relación entre sí, fueron realizados en Saskatchaewan Science Research Center en Canadá, también en GIW laboratorio de KSB Pump USA, descrita por Wilson (1992).

$$V_L = 1.25 \times F_L \times \sqrt[4]{2 \times g \times D \times R_{SD}} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

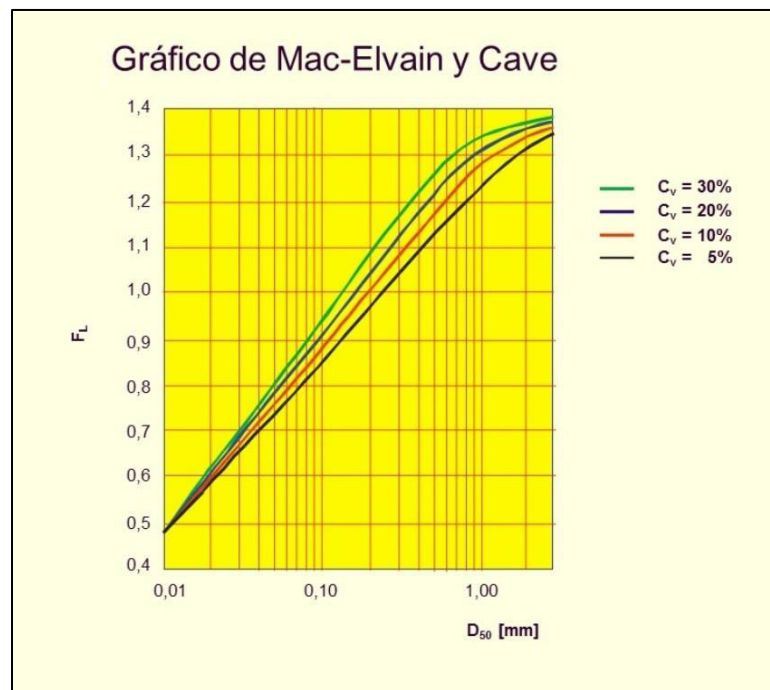
$F_L$ : Parámetro  $f(d_{50}, C_V)$  obtenido del gráfico de Mc Elvain y Cave (Ver figura 5).

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$D$ : Diámetro de la tubería.

$R_{SD}$ : Densidad relativa de sólidos.

**Figura 5:** Gráfica de McElvain y Cave.



Nota: Slurry systems Handbook. Baha Abulnaga 2002.

En la tabla 6 se encuentran los valores de velocidad de sedimentación de ciertos materiales:

DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

**Tabla 6:** *Velocidad de hundimiento de partículas.*

<b>Diámetro de partícula micrómetros</b>	<b>Tamaño en Mesh</b>	<b>Velocidad de hundimiento m/s</b>	<b>Clasificación según ASTM</b>
0.2		$3 \times 10^{-8}$	Arcilla
0.6		$2.8 \times 10^{-7}$	
1		$7 \times 10^{-6}$	
2		$9.2 \times 10^{-6}$	
5		$17 \times 10^{-6}$	Limo
6		$25 \times 10^{-6}$	
20		$28 \times 10^{-5}$	
50	270	$17 \times 10^{-4}$	Arena fina
60	230	$25 \times 10^{-4}$	
100	150	0.07	
200	70	0.021	
250	60	0.026	Arena gruesa
300		0.032	
500	35	0.053	
600	3	0.063	
1000	18	0.1	
2000	10	0.17	

Fuente: Sulzer Pumps, 1988

**2.13.4. Densidad en un fluido no newtoniano**

La densidad de un fluido no newtoniano está en función de 2 parámetros:

- La densidad del líquido que lleva el fluido.
- La densidad de las partículas sólidas.

La densidad de las partículas en sólidos es determinada cuidadosamente por varios métodos experimentales. Finas partículas tienden a entrapar aire, lo cual mediante técnicas en el laboratorio son removidas por agitación o se adhieren pequeñas cantidades de agentes húmedos.

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{C_W}{\rho_S} + \frac{(100-C_W)}{\rho_L}} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

$C_W$  = Concentración por peso.

$\rho_m$  = Densidad de la fase mixta.

$\rho_l$  = Densidad de la fase líquido.

$\rho_S$  = Densidad de la fase sólida

Ingenieros usa los términos de concentración en peso, pero en diseños de tuberías utilizamos el caudal como uno de los principales parámetros, entonces utilizaremos la concentración en términos de volumen. Y es expresada en la ecuación 19.

$$C_v = \frac{C_W \rho_m}{\rho_S} = \frac{100 \frac{C_W}{\rho_S}}{\frac{C_W}{\rho_S} + \frac{(100-C_W)}{\rho_L}} \quad \text{Ec. 19}$$

Y la concentración expresada en peso de sólidos lo expresamos en la ecuación 2.20.

$$C_v = \frac{C_v \rho_S}{\rho_m} = \frac{C_v \rho_S}{C_v \rho_S + (100 - C_v)} \quad \text{Ec. 20}$$



**2.13.5. Viscosidad absoluta para fluidos mixtos de concentración volumétrica menor a 1%**

Para los fluidos no newtonianos, Einstein desarrolló la siguiente fórmula lineal relacionando la viscosidad absoluta y el volumen de concentración.

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = 1 + 2.5\varphi \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

$\mu_m$  = Viscosidad dinámica o absoluta de la mezcla de fluido no newtoniano.

$\mu_L$  = Viscosidad dinámica o absoluta del líquido transportador.

La ecuación 2.20 es muy simple. Asumiendo lo siguiente:

- Las partículas son rígidas.
- La mezcla es bastante diluible y las partículas no interactúan entre sí.

**2.13.6. Viscosidad absoluta para fluidos mixtos de concentración volumétrica mayor a 20%**

Thomas (1965) analizó la ecuación de Einstein, pero utilizando volúmenes altos de concentración en el fluido no newtoniano.

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = 1 + K_1\varphi + K_2\varphi^2 + K_3\varphi^3 + K_4\varphi^4 + \dots \quad \text{Ec. 22}$$

Donde  $K_1, K_2, K_3$  y  $K_4$  son constantes.  $K_1$  es la constante de Einstein 2.5 de la ecuación 2.5,  $K_2$  de acuerdo a Guth and Simha (1936) se encuentra en un rango de 10.05-14.1. Las constantes  $K_3$  y  $K_4$  son difíciles de interpolar y los ignoramos cuando la concentración volumétrica es menor a 20%.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

### ***2.13.7. Viscosidad absoluta para fluidos mixtos de alta concentración volumétrica***

Para altas concentraciones, Thomas (1965) propuso la siguiente ecuación con una función exponencial.

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = 1 + K_1\varphi + K_2\varphi^2 + A\exp(B\varphi) \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

$$K_2 = 10.05$$

$$A = 0.00273$$

$$B = 16.6$$

### ***2.13.8. Calor específico***

Thomas (1960) halló la ecuación de calor específico en función de los calores específicos tanto de la fase líquida y de la sólida.

$$Cp_m = \frac{Cp_m Cp_{ws} + Cp_m C_{wL}}{100} \quad \text{Ec. 24}$$

En la tabla 7, se muestra ejemplos de pipelines de fluidos no newtonianos construidos a partir del año 1957.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

**Tabla 7:** Ejemplos de pipelines para fluidos no newtonianos a partir de 1957.

Mineral	Nombre y lugar del pipeline	DN del pipeline in	Longitud del pipeline km	Sólidos transportados tons/años	Inicio de operaciones
	Consolidation, USA	10	175	1.3	1957
Carbón	Black Mesa, USA	18	440	4.8	1970
	Belonovo, Rusia	24	256	3.4	1985
	Las Truchas, México	10	27	1.5	1976
Hierro	Sierra Grande, Argentina	8	32	2.1	1976
	Samarco, Brasil	20	395	12	1977
	West Irian, Indonesia	4	111	0.3	1972
	Collahuasi, Chile	7	203	1	1999
Cobre	Alumbreira, Argentina	6	314	0.8	1998
	Bougainville, Nueva Guinea	6	32	1	1972

Nota: Slurry systems Handbook. Baha Abulnaga 2002.

### 2.14. Plástico Bingham

El plástico Bingham es un fluido no newtoniano que para que esté en movimiento debe de superar la tensión de fluencia. La relación del esfuerzo cortante con el esfuerzo de fluencia es:

$$\tau_w - \tau_0 = \eta \frac{dy}{dt} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$\tau_w$  = Esfuerzo cortante en las paredes de la tubería.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$\tau_0$  = Esfuerzo cortante de fluencia.

$\eta$  = Coeficiente de rigidez.

La magnitud de fluencia  $\tau_0$  puede tener un valor bajo de 0.01 Pa para lodo o 1000 Mpa para asfalto. El coeficiente de rigidez puede ser bajo como la del agua o 1000 poise (100 Pa.s) que es para pinturas o asfalto.

**Tabla 8:** *Ejemplo de fluidos Bingham*

<b>Fluido</b>	<b>Tamaño de partícula d<sub>50</sub></b>	<b>Densidad kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Esfuerzo de fluencia Pa</b>	<b>Coeficiente de rigidez (cP)</b>	<b>Referencia</b>
Floculado acuoso al 80%	menor a 1 $\mu$ m	1280	59	13.1	Valentik y Whitemore (1965)
Silicato de sodio al 53%	menor a 0.8 $\mu$ m	1103	6	15	Wells (1991)
Bauxita al 21.4%	menor a 200 $\mu$ m	1163	8.5	4.1	Boger y Nguyen (1987)
Óxido de hierro al 18%	menor a 50 $\mu$ m	1170	0.78	4.5	Cheng y Whittaker (1972)
Caliza al 58%	menor a 160 $\mu$ m	1530	2.5	15	Cheng y Whittaker (1972)

Nota: Design of slurry transport systems .B.E.A. Jacob, 2005.

### 2.15. Factor de fricción en flujo laminar para plástico Bingham

Buckingham (1921) fue el primero en desarrollar una ecuación para un flujo laminar. Esta ecuación fue modificada por Hedstrom (1952) y otros personajes y fue expresado en función del número de Reynolds y Hedstrom:

$$\frac{1}{Re_B} = \frac{f_{NL}}{16} - \frac{He}{6Re_B^2} + \frac{He^4}{3f_{NL}^3 Re_B^8} \quad \text{Ec. 26}$$

O

$$f_{NL} = \frac{16}{Re_B} \left[ 1 + \frac{He}{6Re_B} - \frac{He^4}{3f_{NL}^3 Re_B^7} \right] \quad \text{Ec. 27}$$

### 2.16. Factor de fricción en flujo turbulento para plástico Bingham

Hank y Dadia (1971) desarrollaron una ecuación semiesférica para flujo turbulento de un fluido no newtoniano Bingham en un conducto cerrado. Esta ecuación fue modificada por Darby (1992) y cuyo factor de fricción en régimen turbulento es:

$$f_{NT} = 10^a Re_B^b \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$$a = -1.47[1 + 0.146 \exp(-2.9 \times 10^{-5} He)]$$

$$b = -0.193$$

Los valores de los parámetros a y b son hallados empíricamente hallados en un conducto cerrado. Darby (1992) combinó el factor fanning en flujo turbulento y laminar en la siguiente ecuación:

$$f_N = (f_{NL}^m + f_{NT}^m)^{\frac{1}{m}} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

$$m = 1.7 + \frac{40000}{Re_B} \quad \text{Ec. 30}$$

## Capítulo III-Descripción del problema

El transporte de pulpas y relaves es muy común en la extracción de metales y minerales en una mina. Ello conlleva al transporte de los mismos a grandes distancias utilizando sistemas de tuberías de acero al carbono, HDPE o tubería Pex. En el proceso de Flotación la pulpa, la cual posee los minerales en forma de fluido no newtoniano, se lleva a cabo la toma de muestra de pulpa, mediante ella se puede evaluar que tan rica es el porcentaje de sólidos minerales  $C_w$ . Para ello se diseña un cortador primario y se instalará en la línea de la pulpa para tomar una muestra del fluido. Éste fluirá a través de una tubería de descarga que se dirigirá hasta el muestreador para su análisis respectivo. Posterior a ello, la muestra será bombeada de tal manera de que el fluido vuelva a la tolva y por ende a la línea principal. En el presente informe diseñaremos la tubería de descarga considerando los parámetros de funcionamiento del sistema para fluido no newtoniano.

## Capítulo IV-Bases y Criterio de Diseño

## 4.1. Condiciones del sitio

Tabla 9: *Condiciones del sitio para el sistema.*

Propiedad	Valor
Temperatura	10 °C
Elevación	4,500 msnm
Presión atmosférica	57.73 kPa < > 5.2 m

Nota: Criterio de diseño para tuberías. Chinalco.

## 4.2. Propiedades del fluido agua

Tabla 10: *Propiedades del fluido líquido agua.*

Propiedad	Valor	Unidad	Equivalencia	
Densidad del líquido ( $\rho_L$ ):	999.8	kg/m <sup>3</sup>	-	-
Viscosidad dinámica ( $\mu_L$ ):	1.28E-03	Pa-s	1.28	cP
Viscosidad cinemática ( $\nu_L$ ):	1.28E-06	m <sup>2</sup> /s	1.28	cSt
Presión de vapor ( $P_v$ ):	1.23	kPa	0.11	m

Nota: Criterio de diseño para tuberías. Chinalco

### 4.3. Propiedades del sólido

**Tabla 11:** *Propiedades de los sólidos*

Propiedad de las partículas sólidas	Valor	Unidad
Densidad de los sólidos ( $\rho_s$ ):	1450	kg/m <sup>3</sup>
Densidad relativa del sólido ( $R_{SD}$ ):	0.45034875	
Conc. de sólidos en peso ( $C_w$ ):	30	%
Conc. de sólidos en volumen ( $C_v$ ):	22.81	%
Tamaño de partícula ( $d_{50}$ ):	6.00E-05	m
Parámetro $f(d_{50}, C_v)$ ( $F_L$ ):	0.85	-

Nota: Laboratorio de granulometría.

### 4.4. Propiedades de la pulpa

**Tabla 12:** *Propiedades de la pulpa.*

Propiedad de pulpa	Valor	Unidad	Equivalencia	
Densidad ( $\rho_m$ ):	1102.5	kg/m <sup>3</sup>	-	-
Viscosidad dinámica ( $\mu_m$ ):	8.75E-03	Pa-s	8.75	cP
Viscosidad cinemática ( $\nu_m$ ):	7.93E-06	m <sup>2</sup> /s	7.9	cSt

Nota: Laboratorio de granulometría.



## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

### 4.5. Requerimiento del sistema

**Tabla 13:** *Requerimiento del sistema*

<b>Caudal</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Equivalencia</b>	
Caudal mínimo	6.80	m <sup>3</sup> /h	2.25	ton/h
Caudal nominal	7.56	m <sup>3</sup> /h	2.5	ton/h
Caudal máximo	8.31	m <sup>3</sup> /h	2.75	ton/h

Nota: Criterio de diseño para sistema.

**Capítulo V-Cálculos y análisis hidráulicos**

En esta sección realizaremos la selección del diámetro de tubería y mediante las ecuaciones mencionada en ec. 1 (Ecuación de caudal) y ec. 11 (Ecuación de Colebrook-White). Realizando iteraciones se selecciona un diámetro hasta hallar la variable implícita  $D$  (diámetro). Considerar la ecuación 17 (Ecuación de velocidad de sedimentación) y según el estándar ANSI/HI 12.1-12.6 “Rotodynamic (Centrifugal) Slurry Pumps for Nomenclature, Definitions, Applications, and Operation” la velocidad del fluido ( $V$ ) tiene que ser mayor o igual a 1.10 la velocidad de sedimentación.  $V \geq 1.1V_L$ . Seleccionaremos como material de tubería polietileno de alta densidad HDPE.

- Para diámetro nominal 10” y según la tabla 13 para valores de caudal tenemos:

$$\text{Caudal mínimo} = 6.8 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal nominal} = 7.6 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal máximo} = 8.3 \frac{m^3}{h}$$

Hallando la velocidad del fluido según ecuación 1,  $Q = V \times A$  tenemos:

$$\text{Velocidad de caudal mínimo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{6.8 \times 4}{3600 \pi 0.223^2} = 0.05 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal nominal} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{7.6 \times 4}{3600 \pi 0.223^2} = 0.05 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal máximo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{8.3 \times 4}{3600 \pi 0.223^2} = 0.06 \frac{m}{s}$$

Hallando la velocidad de sedimentación según ecuación 17 y teniendo como datos como datos  $F_L = 0.85$  y  $R_{SD} = 0.45$

DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$V_L = 1.25 \times F_L \times \sqrt[4]{2 \times g \times D \times R_{SD}} = 1.25 \times 0.85 \times \sqrt[4]{2 \times 9.81 \times 0.223 \times 0.45} =$$

$$V_L = 1.19$$

Ahora considerando según el estándar el estándar ANSI/HI 12.1-12.6  $V \leq 1.1V_L$

tenemos los siguientes resultados:

**Tabla 14:** Resultados de velocidades de fluido para DN 10".

Caudal	NPS & Schedule	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	D. Interno [m]	V [m/s] (Ec. 2.1)	V <sub>L</sub> [m/s] (Ec. 2.17)	V/V <sub>L</sub>	V ≤ 1.1V <sub>L</sub>
Caudal mínimo	10"	6.8		0.05		0.04	No cumple
Caudal nominal	SDR 11	7.6	0.223	0.05	1.26	0.04	No cumple
Caudal máximo		8.3		0.06		0.05	No cumple

Nota: Elaboración propia.

- Para diámetro nominal 8" y según la tabla 13 para valores de caudal tenemos:

$$\text{Caudal mínimo} = 6.8 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal nominal} = 7.6 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal máximo} = 8.3 \frac{m^3}{h}$$

Hallando la velocidad del fluido según ecuación 1,  $Q = V \times A$  tenemos:

$$\text{Velocidad de caudal mínimo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{6.8 \times 4}{3600 \pi 0.179^2} = 0.07 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal nominal} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{7.6 \times 4}{3600 \pi 0.179^2} = 0.08 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal máximo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{8.3 \times 4}{3600 \pi 0.179^2} = 0.07 \frac{m}{s}$$

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

Hallando la velocidad de sedimentación según ecuación 17 y teniendo como datos como

datos  $F_L = 0.85$  y  $R_{SD} = 0.45$

$$V_L = 1.25 \times F_L \times \sqrt[4]{2 \times g \times D \times R_{SD}} = 1.25 \times 0.85 \times \sqrt[4]{2 \times 9.81 \times 0.179 \times 0.45} =$$

$$V_L = 1.19$$

Ahora considerando según el estándar el estándar ANSI/HI 12.1-12.6  $V \leq 1.1V_L$

tenemos los siguientes resultados:

**Tabla 15:** Resultados de velocidades de fluido para DN 8".

Caudal	NPS & Schedule	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	D. Interno [m]	V [m/s] (Ec. 2.1)	V <sub>L</sub> [m/s] (Ec. 2.17)	V/V <sub>L</sub>	V ≤ 1.1V <sub>L</sub>
Caudal mínimo	8"	6.8		0.075		0.063	No cumple
Caudal nominal	SDR 11	7.6	0.179	0.083	1.19	0.070	No cumple
Caudal máximo		8.3		0.092		0.077	No cumple

Nota: Elaboración propia.

- Para diámetro nominal 6" y según la tabla 13 para valores de caudal tenemos:

$$\text{Caudal mínimo} = 6.8 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal nominal} = 7.6 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal máximo} = 8.3 \frac{m^3}{h}$$

Hallando la velocidad del fluido según ecuación 1,  $Q = V \times A$  tenemos:

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$\text{Velocidad de caudal mínimo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{6.8 \times 4}{3600 \pi 0.138^2} = 0.13 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal nominal} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{7.6 \times 4}{3600 \pi 0.138^2} = 0.14 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal máximo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{8.3 \times 4}{3600 \pi 0.138^2} = 0.16 \frac{m}{s}$$

Hallando la velocidad de sedimentación según ecuación 17 y teniendo como datos como

datos  $F_L = 0.85$  y  $R_{SD} = 0.45$

$$V_L = 1.25 \times F_L \times \sqrt[4]{2 \times g \times D \times R_{SD}} = 1.25 \times 0.85 \times \sqrt[4]{2 \times 9.81 \times 0.138 \times 0.45} =$$

$$V_L = 1.12$$

Ahora considerando según el estándar el estándar ANSI/HI 12.1-12.6  $V \leq 1.1V_L$

tenemos los siguientes resultados:

**Tabla 16:** Resultados de velocidades de fluido para DN 6".

Caudal	NPS & Schedule	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	D. Interno [m]	V [m/s] (Ec. 2.1)	V <sub>L</sub> [m/s] (Ec. 2.17)	V/V <sub>L</sub>	V <= 1.1V <sub>L</sub>
Caudal mínimo	6"	6.8		0.13	0.11		No cumple
Caudal nominal	SDR 11	7.6	0.138	0.14	1.12	0.13	No cumple
Caudal máximo		8.3		0.16	0.14		No cumple

Nota: Elaboración propia.

- Para diámetro nominal 4" y según la tabla 13 para valores de caudal tenemos:

$$\text{Caudal mínimo} = 6.8 \frac{m^3}{h}$$

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$\text{Caudal nominal} = 7.6 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal máximo} = 8.3 \frac{m^3}{h}$$

Hallando la velocidad del fluido según ecuación 1,  $Q = V \times A$  tenemos:

$$\text{Velocidad de caudal mínimo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{6.8 \times 4}{3600 \pi 0.094^2} = 0.28 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal nominal} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{7.6 \times 4}{3600 \pi 0.094^2} = 0.31 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal máximo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{8.3 \times 4}{3600 \pi 0.094^2} = 0.34 \frac{m}{s}$$

Hallando la velocidad de sedimentación según ecuación 17 y teniendo como datos como  $F_L = 0.85$  y  $R_{SD} = 0.45$

$$V_L = 1.25 \times F_L \times \sqrt[4]{2 \times g \times D \times R_{SD}} = 1.25 \times 0.85 \times \sqrt[4]{2 \times 9.81 \times 0.094 \times 0.45} =$$

$$V_L = 1.01$$

Ahora considerando según el estándar el estándar ANSI/HI 12.1-12.6  $V \leq 1.1V_L$

tenemos los siguientes resultados:

**Tabla 17:** Resultados de velocidades de fluido para DN 4".

Caudal	NPS & Schedule	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	D. Interno [m]	V [m/s] (Ec. 2.1)	V <sub>L</sub> [m/s] (Ec. 2.17)	V/V <sub>L</sub>	V ≤ 1.1V <sub>L</sub>
Caudal mínimo	4"	6.8		0.28		0.27	No cumple
Caudal nominal	SDR 11	7.6	0.094	0.31	1.01	0.30	No cumple
Caudal máximo		8.3		0.34		0.33	No cumple

Nota: Elaboración propia.

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

- Para diámetro nominal 2" y según la tabla 4-5 para valores de caudal tenemos:

$$\text{Caudal mínimo} = 6.8 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal nominal} = 7.6 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{Caudal máximo} = 8.3 \frac{m^3}{h}$$

Hallando la velocidad del fluido según ecuación 2.1  $Q = V \times A$  tenemos:

$$\text{Velocidad de caudal mínimo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{6.8 \times 4}{3600 \pi 0.049^2} = 0.98 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal nominal} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{7.6 \times 4}{3600 \pi 0.049^2} = 1.09 \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad de caudal máximo} = \frac{Q}{3600} \times \frac{4}{\pi D^2} = \frac{8.3 \times 4}{3600 \pi 0.049^2} = 1.20 \frac{m}{s}$$

Hallando la velocidad de sedimentación según ecuación 17 y teniendo como datos como datos  $F_L = 0.85$  y  $R_{SD} = 0.45$

$$V_L = 1.25 \times F_L \times \sqrt[4]{2 \times g \times D \times R_{SD}} = 1.25 \times 0.85 \times \sqrt[4]{2 \times 9.81 \times 0.049 \times 0.45} =$$

$$V_L = 0.86$$

Ahora considerando según el estándar el estándar ANSI/HI 12.1-12.6  $V \leq 1.1V_L$

tenemos los siguientes resultados:

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

**Tabla 18:** Resultados de velocidades de fluido para DN 2".

Caudal	NPS & Schedule	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	D. Interno [m]	V [m/s] (Ec. 2.1)	V <sub>L</sub> [m/s] (Ec. 2.17)	V/V <sub>L</sub>	V ≤ 1.1V <sub>L</sub>
Caudal mínimo	2"	6.8		0.98		0.063	Cumple
Caudal nominal	SDR 11	7.6	0.049	1.09	0.86	0.070	Cumple
Caudal máximo		8.3		1.20		0.077	Cumple

Nota: Elaboración propia.

Como vemos los resultados en la tabla 18, el diámetro a seleccionar para la tubería de descarga es de DN2 SDR11. A continuación analizaremos el número de Reynolds (ecuación 5) para ver el régimen en que se encuentra el fluido y la pérdida de carga por longitud de tubería (ecuación 14). Considerar longitud de tubería igual a 30 m. L=30m.

- Para el caudal mínimo  $6.8 \frac{m^3}{h}$  el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} = \frac{0.98 \times 0.049}{0.0000079342690} = 6052.22$$

$Re = 6052.22 > 4000$  Flujo turbulento.

- Para el caudal nominal  $7.6 \frac{m^3}{h}$  el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} = \frac{1.09 \times 0.049}{0.0000079342690} = 6731.56$$

$Re = 6731.56 > 4000$  Flujo turbulento.

- Para el caudal máximo  $8.3 \frac{m^3}{h}$  el número de Reynolds:



## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} = \frac{1.20 \times 0.049}{0.0000079342690} = 7410.89$$

Resumiendo, en la tabla 19 mostramos los números de Reynolds para cada caudal respectivamente. Se observa que el flujo se encuentra en régimen turbulento.

**Tabla 19:** Valores de número de Reynolds para caudales respectivos.

<b>Caudal</b>	<b>NPS &amp; Schedule</b>	<b>Caudal [m³/h]</b>	<b>D. Interno [m]</b>	<b>Número de Reynolds</b>
Caudal mínimo		6.80		6052.22
Caudal nominal	2" SDR 11	7.56	0.049	6731.56
Caudal máximo		8.31		7410.89

Nota: Elaboración propia.

Para las pérdidas primarias ocasionadas por la rugosidad de la tubería (considerar  $\varepsilon = 0.00000152$  y longitud de la tubería 30 m) utilizaremos la ecuación 14 pero antes hallaremos en factor de fricción  $f$  con la ecuación 11 (ecuación de colebrook-white):

- Según la tabla 19 tenemos para caudal mínimo:

$$Re = 6052.22$$

$$D = 0.179$$

Reemplazando valores en la ecuación de colebrook tenemos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.7D} \right)$$

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10} \left( \frac{2.51}{6052.22\sqrt{f}} + \frac{0.00000152}{3.7 \times 0.049} \right)$$

Iterando mediante métodos números Newton Raphson hallamos el valor de  $f$  para el caudal mínimo:

$$f = 0.0354 \text{ para caudal mínimo}$$

- Según la tabla 19 tenemos para caudal nominal:

$$Re = 6731.56$$

$$D = 0.179$$

Reemplazando valores en la ecuación de colebrook tenemos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10} \left( \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.7D} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10} \left( \frac{2.51}{6731.56\sqrt{f}} + \frac{0.00000152}{3.7 \times 0.049} \right)$$

Iterando mediante métodos números Newton Raphson hallamos el valor de  $f$  para el caudal nominal:

$$f = 0.0343 \text{ para caudal nominal}$$

- Según la tabla 19 tenemos para caudal máximo:

$$Re = 7410.89$$

$$D = 0.179$$

Reemplazando valores en la ecuación de colebrook tenemos:

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10} \left( \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.7D} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10} \left( \frac{2.51}{7410.89\sqrt{f}} + \frac{0.00000152}{3.7 \times 0.049} \right)$$

Iterando mediante métodos números Newton Raphson hallamos el valor de  $f$  para el caudal máximo:

$f = 0.0335$  para caudal máximo.

Resumiendo, en la tabla 20 los valores de factor de fricción para los caudales respectivos:

**Tabla 20:** *Valores de factor de fricción para caudales respectivos.*

<b>Caudal</b>	<b>NPS &amp; Schedule</b>	<b>Caudal [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>D. Interno [m]</b>	<b>Número de Reynolds</b>	<b>Factor de fricción f</b>
Caudal mínimo		6.80		6052.22	0.0354
Caudal nominal	2" SDR	7.56	0.049	6731.56	0.0343
Caudal máximo	11	8.31		7410.89	0.0335

Nota: Elaboración propia.

Ahora aplicando la ecuación 14, pérdidas primarias tenemos para cada caudal los siguiente:

- Para caudal mínimo tenemos:

## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

$$f=0.0354$$

$$V = 0.98 \frac{m}{s}$$

$$L = 30 \text{ m}$$

$$D = 0.049$$

$$H = \frac{fV^2L}{2gD} = \frac{0.0354 \times 0.98^2 \times 30}{2 \times 9.81 \times 0.049} = 1.06 \text{ m}$$

- Para caudal nominal tenemos:

$$f=0.0343$$

$$V = 1.09 \frac{m}{s}$$

$$L = 30 \text{ m}$$

$$D = 0.049$$

$$H = \frac{fV^2L}{2gD} = \frac{0.0343 \times 1.09^2 \times 30}{2 \times 9.81 \times 0.049} = 1.27 \text{ m}$$

- Para caudal máximo tenemos:

$$f=0.0335$$

$$V = 1.20 \frac{m}{s}$$

$$L = 30 \text{ m}$$

$$D = 0.049$$

$$H = \frac{fV^2L}{2gD} = \frac{0.0335 \times 1.20^2 \times 30}{2 \times 9.81 \times 0.049} = 1.54 \text{ m}$$

Resumiendo, en la tabla 21 tenemos los valores de pérdidas primarias.

DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

**Tabla 21:** *Valores de pérdidas primarias para los caudales respectivos.*

<b>Caudal</b>	<b>NPS &amp; Schedule</b>	<b>Caudal [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>D. Interno [m]</b>	<b>Longitud de tubería [m]</b>	<b>Pérdidas primarias [m]</b>
Caudal mínimo	2"	6.80	0.18	30	1.06
Caudal nominal	SDR 11	7.56			1.27
Caudal máximo		8.31			1.54

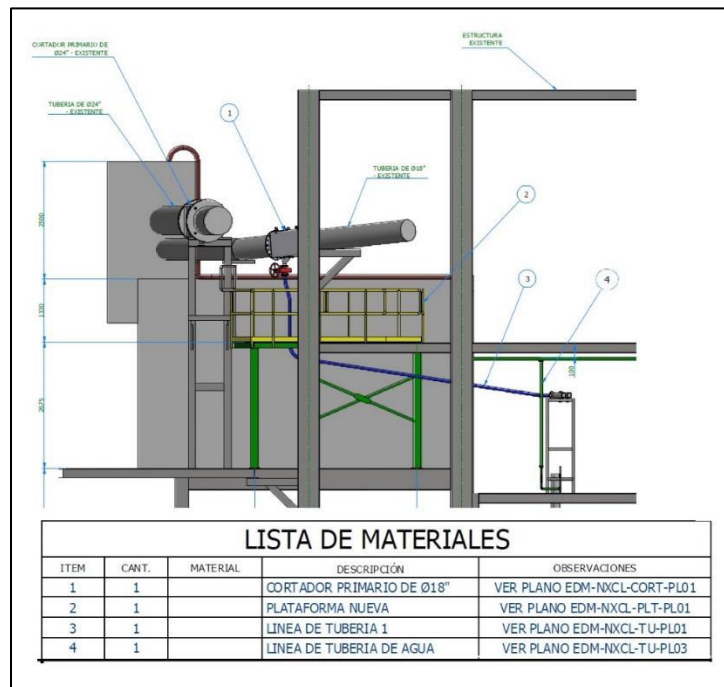
Nota: Elaboración propia.

# DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

## Conclusiones

- Se hallaron los requerimientos del sistema para la selección de una tubería de diámetro nominal de 2 pulgadas, material HDPE según tabla 18.
- Para su espesor se seleccionó SDR11 que es un grosor conveniente por el régimen turbulento que hemos hallado en la tabla 19.
- Los parámetros hidráulicos de la pulpa para el sistema crítico seleccionado son; caudal máximo de 8.3 m<sup>3</sup>/h, una velocidad de la pulpa de 1.20 m/s y una velocidad de sedimentación de 0.86 m/s.
- En la figura 6 se muestra el esquema de la tubería de descarga (ver ítem 3) que inicia su recorrido desde el cortador primario.

**Figura 6:** Esquema de la tubería de descarga HDPE DN 2 SDR11.



Nota: Elaboración propia.

### Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudio previo de la pulpa para saber su porcentaje de partículas de sólido y líquidos. Este estudio se hace a través del método de balanza Marcy. La información obtenida es importante porque es un input para el desarrollo de los cálculos.
- Para hallar el factor de fricción  $f$  se recomienda utilizar métodos numéricos para la solución del factor de fricción ya que es una variable de una ecuación implícita. Para este desarrollo se sugiere buscar soporte en una hoja de cálculo Excel o en una calculadora programable.
- Para el resto de cálculos al ser repetitivos se recomienda soporte de una hoja de cálculo Excel para optimizar el tiempo de solución de variables.
- Para el cálculo no se consideró accesorios por ser la longitud de 30 metros de tubería relativamente corto, por ello se obvia esas pérdidas secundarias de fricción.

**Bibliografía**

- ANSI/HI 9.6.7. Effects of Liquid Viscosity on Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pump Performance.
- ANSI/HI 12.1-12.6. Rotodynamic (Centrifugal) Slurry Pumps for Nomenclature, Definitions, Applications, and Operation.
- Engin T., Gur M. (2001). Performance Characteristics of a Centrifugal Pump Impeller with Running Tip Clearance Pumping Liquid-Solids Mixtures", ASME J Fluids Eng, 123, pp. 523-538.
- Engin T. (2007). Prediction of relative efficiency reduction of centrifugal slurry pumps: empirical and artificial-neural network-based methods, Proc. IMechE Vol. 221 Part S: J. Power and Energy, pp. 41-50.
- Abulnaga, B. E. 1997. Slurcal-Computer Program for Non-Newtonian Flows. Flour Daniel Wright. Engineers, Vancouver, BC, Canada.
- Aral, B. K, and D. M. Kaylon. 1994. Effect of temperature and Surface roughness on time dependent development of wall slip in steady torsional flow of concentrate suspensions. Journal of Rheology, 38, 957-972.
- ASME B31.3. Process Piping

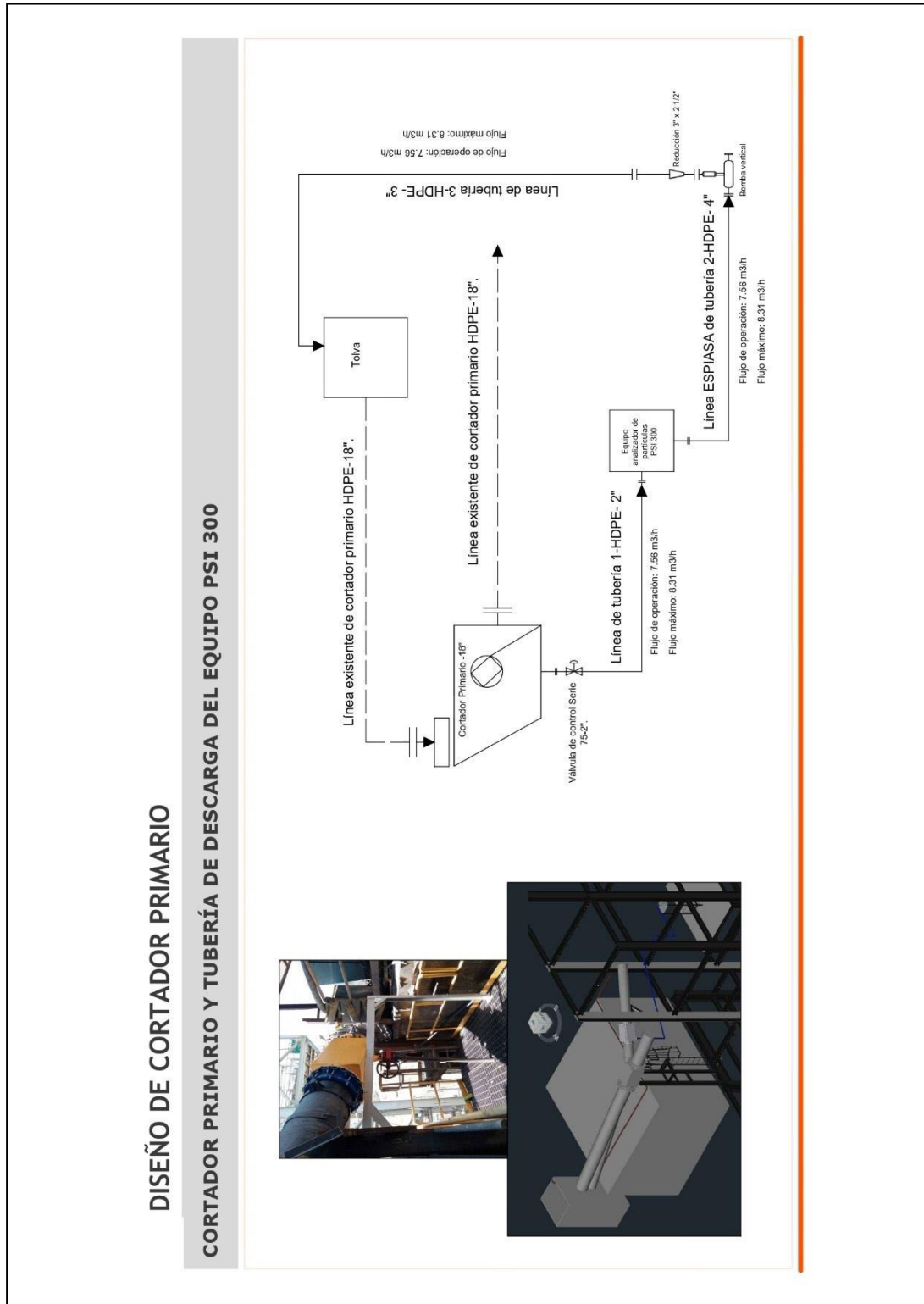


## DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

- Darby, R. 2000. Pressure drop of non-Newtonian slurries, a wider path. *Chemical Engineering*, 107, 5,64-67.
- Churchill, S. W. 1977. Friction factor equation spans all fluids flow regimes. *Chemical engineering* 84, 7, 91-92.
- Wilson, K. C. 1991. Slurry transport in flumes. In *slurry handling*. Edited by N.P. Brown and N. I. Heywood. New York: Elsevier Applied Sciences.

Anexos.

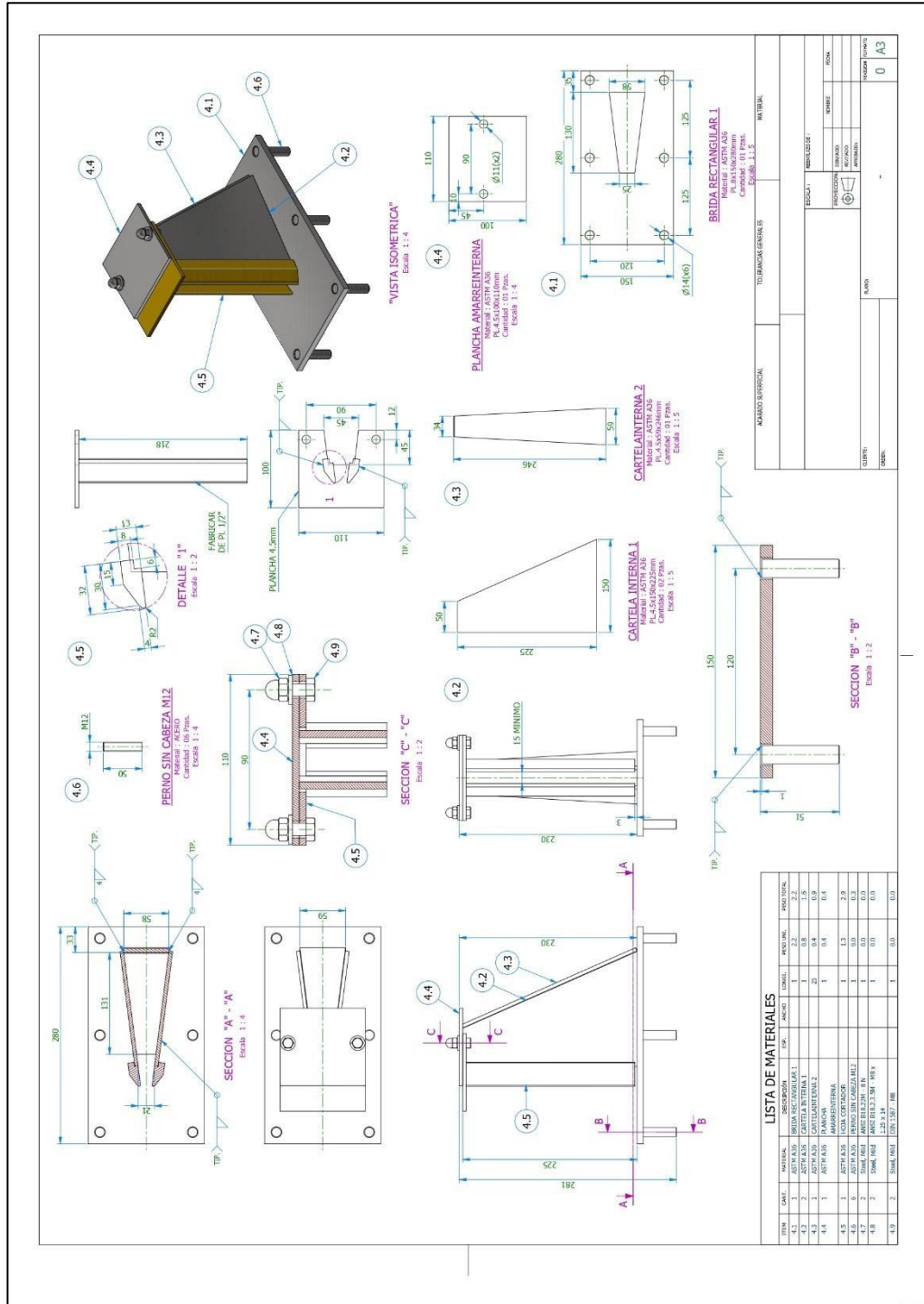
Anexo 1: Flowsheet del sistema. Tubería de descarga.





# DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

## Anexo 3: Cortador primario de donde inicia la tubería de descarga.





# DISEÑO DE TUBERÍA PARA PULPA EN LA MINA CHINALCO

Anexo 5: Esquema general para la tubería de descarga.

