UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD DE UN DUCTO PARA EL TRASLADO DE CONCENTRACIÓN ACUOSA DE COBRE

Trabajo de titulación para optar al título de técnico universitario en MINERÍA Y METALURGIA

Alumnos:
Christian Ignacio González Góngora
Silvana Ayline Guzmán Martínez

Profesor Guía:
Ing. Luis Gutiérrez Meneses

2019

RESUMEN

KEYWORDS: FERROCARRIL - CONCENTRADUCTO - TRANSPORTE - PULPA.

El estudio realizado en el siguiente trabajo se basa principalmente en proponer la modificación del medio de transporte discontinuo actual, como es el ferrocarril, por un medio continuo, ya que este último medio funciona constantemente, lo que quiere decir que no provoca tiempos muertos para la empresa en su retorno, en cual va vacío y hace ineficiente ese recorrido al no llevar carga.

Según el estudio realizado por nosotros, y con la distancia existente entre la minera Andina y la planta de CODELCO Ventanas, la alternativa propuesta, será de un concentra ducto. Este método es empleado en grandes mineras y con largos trayectos de transporte, que posee ventajas, tales como:

a) No son contaminantes, ya que, en caso de cualquier situación anómala ocurrida, este método contará con piscinas de emergencia, que van a almacenar todo el contenido trasladado sin contaminar la superficie.

b) Trasladan grandes cantidades de líquidos, que van relacionados con los factores operacionales, tales como: diámetro de la tubería, velocidad del fluido y caudal transportado.

El recorrido del nuevo sistema de transporte tendrá un trayecto de 142 kilómetros de distancia, lo que se va a trazar desde el Puerto de Saladillo hasta la planta de CODELCO Ventanas, específicamente a un costado de la carretera automovilística, involucrando varias ciudades, lo que posteriormente se realizará un estudio de suelos de las principales comunas involucradas.

El material escogido para la tubería utilizada se trata de un Acero API 5L grado x70, con un revestimiento interno en goma, lo que sirve notoriamente para dar resistencia al impacto mecánico al ducto, por cualquier golpe o accidente fortuito que pueda ocurrir.

Como consecuencia del nuevo método de transporte a estudiar, existen una serie de cálculos y factores operacionales, en los cuales destacan: el coeficiente de fricción, la viscosidad del fluido a trasladar, número de Reynolds, y a partir de este último, el tipo de flujo transportado.

Al comienzo y al final del trayecto, la pulpa de cobre se almacenará en un estanque al aire libre, es decir, con presión atmosférica.

A partir del trazado realizado en la aplicación Google Earth, nos arroja un perfil de elevación, el cual va disminuyendo mientras más distancia posea. Ya que el origen del trayecto comienza a una elevación de 1.532 metros de altura sobre el nivel del mar, y el destino acaba con una elevación de 13 msnm.

Por ende, para vencer las pérdidas de energía y las dificultades que se presenten en el trayecto, realizaremos una serie de cálculos que nos dará a conocer la carga total necesaria que debemos suplir para que el mineral llegue a su destino bajo las condiciones operacionales mínimas, y así pueda ser procesado.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 2
OBJETIVOS 4
OBJETIVO GENERAL: 4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: 4
CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MINERAL 5
1. SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MINERAL 6
1.1. MEDIOS DE TRASLADO DE MINERAL 7
1.1.1. Transporte del mineral por medio continuo: 7
1.1.2. Transporte del mineral por medio discontinuo: 7
1.2. PRINCIPALES MINERAS DE LA IV, V Y VI REGIÓN DE CHILE 8
1.3. MÉTODOS DE TRANSPORTE DE MINERAL DE LAS MINAS 9
1.3.1. Minera Los Pelambres: 9
1.3.2. Minera El Soldado 10
1.3.3. Minera Andina: 12
1.3.4. Minera Los Bronces: 13
1.3.5. Minera El Teniente: 15
CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS 17
2. GEOTECNIA DE SUELOS 18
2.1. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO 18
2.1.1. Características del suelo 19
2.1.2. La consistencia del suelo 19
2.1.3. Fuerza del suelo 20
2.2. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LAS COMUNAS 21
2.2.1. PUCHUNCAVÍ: 21
2.2.2. QUINTERO: 22
2.2.3. QUILLOTA: 23
2.2.4. LA CALERA: 24

2.2.5. HUALCAPO: 25
2.2.6. LLAY - LLAY: 26
2.2.7. PANQUEHUE: 27
2.2.8. LOS ANDES: 28
CAPÍTULO 3: CÁLCULOS OPERACIONALES PARA UN SISTEMA DE TUBERÍAS 29
3. SISTEMA DE TUBERIAS 30
3.1. CÁLCULO DEL FLUJO DE PULPA TRANSPORTADA 31
3.2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA PULPA TRANSPORTADA 32
3.3. CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DE LA PULPA 32
3.4. CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS 33
3.4.1. TIPOS DE FLUJOS: 33
3.4.1.1. Flujo laminar: 33
3.4.1.2. Flujo turbulento: 34
3.4.1.3. Flujo en transición: 34
3.5. FACTOR DE FRICCIÓN 35
3.6. PÉRDIDAS DE CARGA 36
3.7. ECUACIÓN DE BERNOULLI 37
CONCLUSIÓN 40
RECOMENDACIONES 41
BIBLIOGRAFÍA 42
ANEXOS 44
ANEXO A: 44
ANEXO B: 49

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen N° 1-1: “Cinta transportando mineral”. 7
Imagen N° 1-2: "Ferrocarril transportando mineral". 7
Imagen N° 1-3: "Mapa de mineras en IV, V y VI región". 8
Imagen N° 1-4: “Ubicación Mina Los Pelambres”. 9
Imagen N° 1-5: “Puerto de Punta Chungo lV región”. 9
Imagen N° 1-6: “Localización minera El Soldado”. 10
Imagen N° 1-7: “Camión transportando concentrado de cobre hacia Chagres”. 11
Imagen N° 1-8: “Ubicación mina Andina”. 12
Imagen N° 1-9: “Ferrocarril transportando concentrado de cobre hacia Ventanas”. 13
Imagen N° 1-10: “Ubicación Minera Los Bronces”. 13
Imagen N° 1-11: “Mineroducto de transporte de mineral Los Bronces”. 14
Imagen N° 1-12: “Ubicación de la Minera El Teniente”. 15
Imagen N° 1-13: “Ferrocarril utilizado en El Teniente”. 16
Imagen N° 2-14: "Excavadora realizando un oleoducto". 18
Imagen N° 2-15: "Suelo arcilloso agrietado". 20
Imagen N° 3-16: “Flujo laminar”. 33
Imagen N° 3-17: “Flujo turbulento”. 34
Imagen N° 3-18: “Flujo en transición”. 34
Imagen N° 3-19: Sistema de bombas en paralelo. 38
Imagen N° 3-20: Sistema de bombas en serie. 38
Imagen N° 3-21: Ficha técnica bomba KSB Modelo LCC-M. 39

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1-1: Índices de accidentes entre el año 2012 hasta 2018(Abril). 3

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1-1: Estadísticas del gráfico N° 1: Índices de accidentes. 3
Tabla N° 1-2: Cuadro resumen del medio transporte minero. 16
Tabla N° 2-3: Características geotécnicas del suelo de Puchuncaví. 21
Tabla N° 2-4: Características geotécnicas del suelo de Puchuncaví, según profundidad. 21
Tabla N° 2-5: Características geotécnicas del suelo de Quintero. 22
Tabla N° 2-6: Características geotécnicas del suelo de Quintero, según profundidad. 22
Tabla N° 2-7: Características geotécnicas del suelo de Quillota. 23
Tabla N° 2-8: Características geotécnicas del suelo de Quillota, según profundidad. 23
Tabla N° 2-9: Características geotécnicas del suelo de La Calera. 24
Tabla N° 2-10: Características geotécnicas del suelo de La Calera, según profundidad. 24
Tabla N° 2-11: Características geotécnicas del suelo de Hualcapo. 25
Tabla N° 2-12: Características geotécnicas del suelo de Hualcapo, según profundidad. 25
Tabla N° 2-13: Características geotécnicas del suelo de Llay Llay. 26
Tabla N° 2-14: Características geotécnicas del suelo de Llay Llay, según profundidad. 26
Tabla N° 2-15: Características geotécnicas del suelo de Panquehue. 27
Tabla N° 2-16: Características geotécnicas del suelo de Panquehue, según profundidad. 27
Tabla N° 2-17: Características geotécnicas del suelo de Los Andes. 28
Tabla N° 2-18: Características geotécnicas del suelo de Los Andes, según profundidad. 28
Tabla N° 3-19: Cuadro resumen de información recopilada. La interpretación de los valores de velocidades límites no es exacta debido a que proviene de operaciones industriales. 30
Tabla N° 3-20: Datos del concentrado de cobre. 31
Tabla N° 3-21: Valores calculados a partir de los datos de la tabla anterior. 31
Tabla N° 3-22: Valores Re y Tipos de flujos. 33
Tabla N° 3-23: Valores de la rugosidad relativa. 36

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

FEPASA	Ferrocarril del Pacífico Sociedad Anónima.
CODELCO	Corporación Nacional del Cobre.
SAG	Semiautógeno.
TRV	Transporte Ruperto Vásquez
Cu	Cobre
LHD	Load Haul Dump. / Cargador de transporte y descarga.
Cv	Concentración volumétrica del sólido.
Re	Número de Reynolds.
TDH	Total Dynamic Head / Cabezal dinámico total.
H_L	Pérdida de carga.

B. SIMBOLOGÍA

[Km]	Kilómetros.
[h]	Hora.
[m^3]	Metro cúbico.
[kton]	Kilo tonelada.
%	Porcentaje.
[ton]	Toneladas.
[mm]	Milímetros.
[cm]	Centímetros.
[s]	Segundos.
[m]	Metro.
[m^2]	Metro cuadrado.
[Pa]	Pascal.
μ	Viscosidad.
e	Euler.
[kg]	Kilogramos.
[rpm]	Revoluciones por minuto.
F	Factor de fricción.
P	Presión.
P	Densidad.

INTRODUCCIÓN

En Chile, en las distintas mineras que existen a lo largo del territorio, trabajan con uno de los productos más importantes del país como es el cobre (Cu). Según Sernageomin, este mineral aparte de ser la principal exportación de Chile, ocupa la tercera parte de todas las reservas de cobre en el mundo.

Actualmente la minera Andina produce 2550 toneladas de concentrado de cobre al día, los cuales son transportados a través de un ferrocarril desde la estación Saladillo hasta el Puerto Ventanas en donde se encuentra la planta de procesamiento de Codelco.

El ferrocarril al ser un medio de transporte discontinuo provoca tiempos muertos para la empresa que realiza el transporte del mineral, ya que en su regreso hacia la estación de cargamento va vacío, es decir, sin carga, provocando gastos de combustible, demoras, altos índices de accidentes, mortalidades y retrasos en realizar el trayecto.

A su vez, existen medios de transportes por medio continuo, como lo son las correas transportadoras y los concentra ductos. Estos últimos comenzaron a ser importantes desde que se comenzó a procesar mineral en plantas de tratamiento durante el Siglo XIX.

Los concentra ductos trasladan pulpas de concentrados, es decir, una mezcla de los sólidos de cobre y agua. Estos operan en una tubería cerrada sin aire, solo con presión que tiene que ser mayor a la atmosférica.

El sistema que utilizamos para guiarnos fue el método actual que utiliza la Minera Los Pelambres para trasladar su concentrado de cobre. El ducto de esta mina va hasta el Puerto Punta Chungo, en Los Vilos donde se encuentra el centro de embarque, teniendo bajos índices de accidentes, y a la vez, sin daños ni emergencias para la comunidad habitante en el lugar.

Este trabajo consiste en la propuesta de una nueva alternativa para el traslado del concentrado de cobre de la minera Andina. Y para ello se realizará una caracterización a las comunas por la cual pasaría el ducto, con el fin de conocer las características geotécnicas del suelo, además de una serie de cálculos que se llevarán a cabo para satisfacer las condiciones mínimas de traslado para un sistema de tubería.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la minera Andina ubicada en Los Andes transporta su concentrado de cobre a través de un tren de la empresa Ferrocarril del Pacífico S.A (FEPASA), el cuál presenta efectos negativos, los cuales se nombran a continuación:

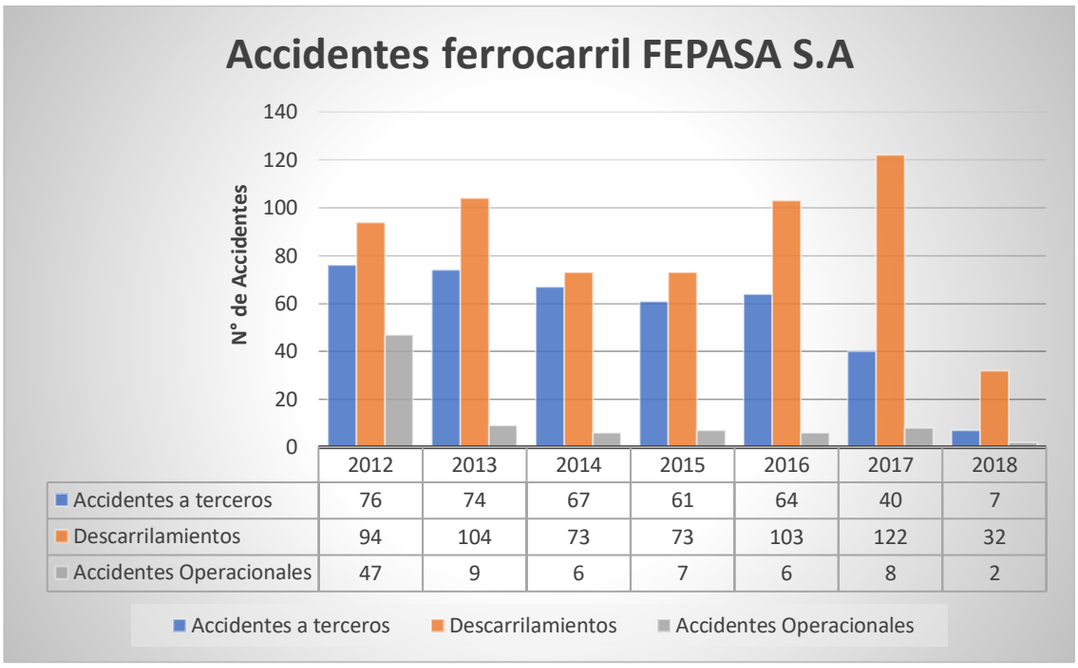
1. El ferrocarril transporta el concentrado desde la Estación Saladillo hasta el Puerto de Ventanas (Planta de procesamiento CODELCO), teniendo éstas dos una distancia de 169 kilómetros, según la trayectoria trazada por las vías ferroviarias en Google Earth, provocando demora en el traslado del mineral ya que la velocidad máxima para trenes de carga es de 40 km/h, según el Decreto 150 de la fecha 10-dic-2011 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

2. Con relación a la población situada a cercanías de la línea férrea, el sonido que genera el ferrocarril en el transcurso de su recorrido se considera molesto y ruidoso, ya que al moverse la máquina o hacer funcionar su silbato en cada cruce por precaución, supera los límites máximos, siendo el silbato el que sin duda genera más ruido ya que emite 110 decibeles, y por norma se consideran ruidos molestos los que superan los 55 decibeles en horario de 7:00 a 21:00 horas, y los 45 decibeles de 21:00 a 7:00 horas, según el decreto 48 del Ministerio del Medio Ambiente del 2011.

3. Respecto a los accidentes sufridos por el ferrocarril, transportista del mineral, dentro de los 7 últimos años, nos encontramos con 3 tipos: accidentes operacionales, los descarrilamientos o los daños a terceros. Estos presentan índices de riesgos de muertes y/o lesiones, que sufren las personas como consecuencia de la circulación del ferrocarril, como también los daños que causan los descarrilamientos de vagones, o la caída y derrame de la carga transportada.

A continuación, se aprecia un gráfico que muestra los índices de accidentes (Gráfico N° 1-1), que están presentes por la utilización del ferrocarril.

Gráfico N° 1-1: Índices de accidentes entre el año 2012 hasta 2018(Abril).



Fuente: FEPASA S.A

Tabla N° 1-1: Estadísticas del gráfico N° 1: Índices de accidentes.

ene-12	2	9	3
feb-12	2	4	10
mar-12	2	10	3
abr-12	4	4	4
may-12	2	10	11
jun-12	6	11	7
jul-12	9	8	6
ago-12	11	6	3
sept-12	4	6	5
oct-12	2	11	12
nov-12	2	5	7
dic-12	1	10	5
ene-13	0	7	5
feb-13	1	5	3
mar-13	1	9	4
abr-13	1	16	7
may-13	0	11	12
jun-13	2	10	7
jul-13	0	12	6
ago-13	2	10	7
sept-13	0	5	5
oct-13	1	6	5
nov-13	0	7	8
dic-13	1	6	5

ene-14	0	2	2
feb-14	0	9	7
mar-14	1	10	4
abr-14	0	5	5
may-14	1	7	6
jun-14	1	6	4
jul-14	0	7	9
ago-14	0	3	5
sept-14	0	4	7
oct-14	1	5	10
nov-14	1	6	6
dic-14	1	9	2
ene-15	1	7	8
feb-15	0	3	4
mar-15	1	7	2
abr-15	1	5	4
may-15	0	5	3
jun-15	2	4	6
jul-15	0	6	6
ago-15	2	15	4
sept-15	0	8	6
oct-15	0	5	4
nov-15	0	4	8
dic-15	0	4	6

ene-16	0	8	6
feb-16	0	5	4
mar-16	0	6	8
abr-16	0	18	6
may-16	0	11	6
jun-16	1	4	5
jul-16	1	9	5
ago-16	1	13	5
sept-16	1	6	4
oct-16	0	7	4
nov-16	0	7	6
dic-16	2	9	5
ene-17	1	6	3
feb-17	1	11	4
mar-17	0	6	5
abr-17	0	8	3
may-17	0	12	4
jun-17	1	19	4
jul-17	0	9	2
ago-17	2	11	2
sept-17	1	14	0
oct-17	1	10	9
nov-17	1	7	2
dic-17	0	9	2

ene-18	1	5	6
feb-18	1	9	1
mar-18	0	11	0
abr-18	0	7	0

Fuente: Elaboración propia a partir del gráfico de accidentes.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Realizar un estudio de prefactibilidad para el traslado de concentración acuosa de cobre a través de un ducto, desde Saladillo a Puerto Ventanas, optimizando el transporte del mineral.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

I. Reconocer las mineras de la IV a la VI región según los distintos medios de transportes de mineral utilizados.

II. Caracterizar las condiciones de los sectores invadidos, tanto por el ferrocarril como por el concentra ducto, según características geotécnicas del suelo y climatológicas.

III. Proponer un sistema de tubería que satisfaga las condiciones mínimas para el traslado del material según condiciones operacionales.

CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MINERAL

1. SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MINERAL

En las mineras actuales, tales como: Los Pelambres, El Soldado, Andina, Los Bronces y El Teniente, se emplean diferentes métodos de transporte para el mineral que producen cada día. El sistema de transporte escogido tiene un alto valor estratégico, ya que depende de varios factores que lo hacen rentable operacionalmente.

Un sistema de transporte de un mineral producido hace referencia al traslado que éste debe cumplir mediante diferentes medios mecánicos de distinta índole, para llegar a la planta de tratamiento del mineral, para así, aumentar su concentración, su pureza y llegar finalmente al cátodo, o al producto final que produce la minera.

Para escoger un sistema de transporte para el mineral adecuado, se tienen una serie de factores para tener en cuenta, tales como:

- Granulometría del mineral a trasladar.
- Capacidad del medio para el transporte.
- Distancia entre el lugar de explotación y el lugar del tratamiento del mineral.
- Diferencia de altura entre ambos lugares.
- Costos económicos.

1.1. MEDIOS DE TRASLADO DE MINERAL

A grandes rasgos, los medios de transporte de mineral se clasifican en dos medios. Los cuales son:

1.1.1. Transporte del mineral por medio continuo: Utilizan medios de transporte que están continuamente en funcionamiento. En este caso se realizan a través de:

- Cintas transportadoras.
- Ductos.

Imagen N° 1-1: “Cinta transportando mineral”.

Fuente: Minería Chilena.

1.1.2. Transporte del mineral por medio discontinuo: Utilizan medios mecanizados, los cuales provocan tiempos muertos al ir de vuelta, ya que en su retorno van vacíos, haciendo el proceso ineficiente. En este caso se realizan a través de:

- Ferrocarriles.
- Camiones.

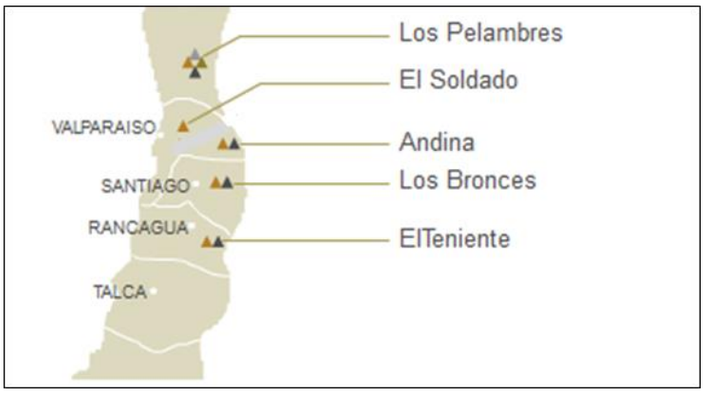
Imagen N° 1-2: "Ferrocarril transportando mineral".

Fuente: LosAndesOnline.

1.2. PRINCIPALES MINERAS DE LA IV, V Y VI REGIÓN DE CHILE

De acuerdo con la imagen N° 1-3 estipulada a continuación, se dan a conocer las principales mineras de la IV a la VI región del país, las cuales destacan las siguientes:

Imagen N° 1-3: "Mapa de mineras en IV, V y VI región".



Fuente: Hugh Rudnick.

A partir de la imagen anterior, se realizará un estudio a cada una de las grandes mineras nombradas, para así conocer el método de transporte del mineral que procesan, y con ello, realizar un cambio del transporte de mineral específicamente de la mina Andina, siendo elegido el más eficiente para la industria.

1.3. MÉTODOS DE TRANSPORTE DE MINERAL DE LAS MINAS

1.3.1. Minera Los Pelambres:

La minera Los Pelambres es una mina a cielo abierto, está ubicada en la IV región de Coquimbo, específicamente en la comuna de Salamanca (Imagen N° 1-4). El principal producto que elabora esta mina es el concentrado de cobre, aunque también trabajan con concentrado de Molibdeno.

Imagen N° 1-4: "Ubicación Mina Los Pelambres".

Fuente: Antofagasta Minerals.

La Mina Los Pelambres posee una planta concentradora, en la cual se realiza el trabajo de pasar el concentrado de cobre a pulpa, es decir, se le añade una cantidad de agua estipulada. Posteriormente, la pulpa de cobre con un caudal de 140 [m^3/h] y mediante la gravedad, desciende hasta un concentraducto de 122 kilómetros de distancia, que finaliza en el Puerto de Punta Chungo, ubicado en Los Vilos (Imagen N° 1-5).

Imagen N° 1-5: "Puerto de Punta Chungo IV región".

Fuente: Antofagasta Minerals.

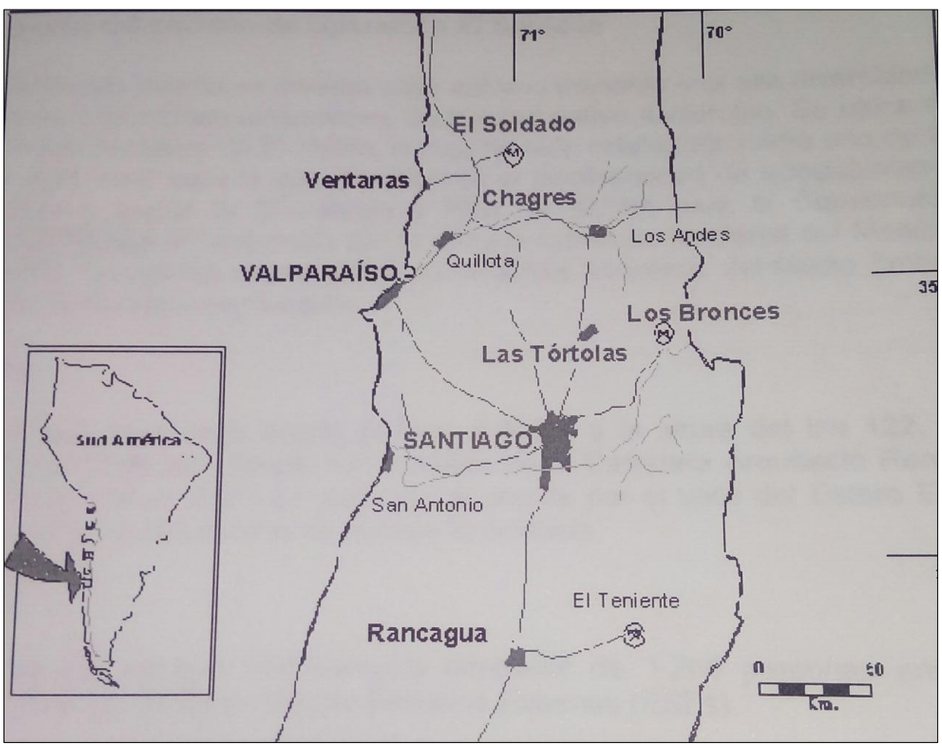
Por otro lado, el concentrado de Molibdeno también producido por Minera Los Pelambres, es transportado mediante camiones ramplas con acoplado incluido, los cuales tienen una capacidad aproximada de 28 toneladas de mineral.

Los camiones trasladan el concentrado de Molibdeno para la economía nacional y extranjera, aunque ésta última, es transportada mediante vía marítima que inician su trayecto en el puerto de San Antonio, región de Valparaíso.

1.3.2. Minera El Soldado

La minera El Soldado es una mina a cielo abierto, está ubicada en la V región de Valparaíso, específicamente en la comuna de Nogales (Imagen N° 1-6). La producción de la Minera El Soldado es aproximadamente veinte kilotoneladas al mes de concentrado de cobre, con una ley promedio entre veinticinco y treinta por ciento de cobre.

Imagen N° 1-6: “Localización minera El Soldado”.



Fuente: AngloAmerican.

La mina el Soldado posee una planta de Sulfuros, la cual está compuesta por un chancador primario, que posteriormente alimenta un molino semi autógeno (SAG) que genera dos productos:

- Mineral con un tamaño apto para el proceso de flotación.
- Mineral que es enviado a chancado secundario y terciario, luego a molienda convencional, para posteriormente pasar al proceso de flotación.

El concentrado producido en la etapa de flotación es llevado a una etapa de limpieza, obteniendo un producto con una ley entre veinticinco a treinta por ciento de cobre.
El concentrado que se obtiene finalmente es filtrado para obtener la mínima cantidad de humedad que se pueda para ser despachado, aproximadamente un diez por ciento.
El producto minero obtenido, es enviado a la planta de fundición de Chagres, mediante camiones acoplados que poseen una capacidad entre 25 a 30 toneladas de concentrado de cobre (Imagen N° 1-7).

Imagen N° 1-7: “Camión transportando concentrado de cobre hacia Chagres”.

Fuente: TRV.

1.3.3. Minera Andina:

La minera Andina es una mina que posee operaciones tanto a cielo abierto como subterráneas. Éstas últimas se realizan en la mina subterránea de Río Blanco, en cambio, las labores a cielo abierto se desarrollan en la mina Sur Sur.

La minera Andina se encuentra ubicada en la V región de Valparaíso, específicamente en la comuna de Los Andes (Imagen N° 1-8). Minera Andina produce como materia prima fundamental el concentrado de cobre, aunque del mismo proceso, Andina produce Molibdeno, como un subproducto comercial.

Imagen N° 1-8: "Ubicación mina Andina".

Fuente: Consejo minero.

La minera Andina posee una planta concentradora, la cual posee una etapa de flotación, que produce que el mineral salga aproximadamente entre un 28,5 a 30,5% de Cu. Posterior a ello, la pulpa de concentrado de cobre proveniente de la flotación pasa a una etapa de filtrado, prensado y soplado, obteniendo el mineral con una humedad mayor o igual al 15%.

La etapa siguiente es el transporte del concentrado, la cual se realiza mediante un ferrocarril, que va desde Saladillo hacia la planta de procesamiento de CODELCO Ventanas. Este ferrocarril transporta 35 vagones con concentrado, teniendo en cuenta que cada uno de ellos tiene la capacidad de 34 toneladas de carga (Imagen N° 1-9).

Imagen N° 1-9: “Ferrocarril transportando concentrado de cobre hacia Ventanas”.

Fuente: El Andino.

1.3.4. <u>Minera Los Bronces:</u>

La minera Los Bronces es una mina a cielo abierto, está ubicada en la Región Metropolitana, específicamente en la comuna de Lo Barnechea (Imagen N° 1-10). La minera Los Bronces elabora como principal producto el concentrado de cobre, aunque como producto secundario, trabaja también con concentrado de Molibdeno.
Además de esto, en la minera Los Bronces ejercen labores para producir cobre en cátodos.

Imagen N° 1-10: “Ubicación Minera Los Bronces”.

Fuente: Consejo Minero.

La minera Los Bronces, extrae el mineral y posteriormente pasa a la etapa de la conminución, es decir, a la reducción de tamaño de él mismo. Esta posee chancadores y molinos, lo que finalmente logran un tamaño de la partícula de 180 micrones. Cuando el mineral logra el tamaño adecuado luego de haber sido molido y triturado, la etapa siguiente es el transporte de este. El transporte del mineral se realiza a través de un mineroducto, que tiene una longitud aproximada de 56 kilómetros de largo (Imagen N° 1-11), a lo que llega finalmente a la planta de flotación, ubicada en Las Tórtolas.

Posterior a ello, el mineral como concentrado, tiene aproximadamente entre un 25 a 30% de cobre respectivamente.

El proceso final del cobre como concentrado, es el espesamiento y filtrado de la pulpa proveniente de la etapa de flotación, lo que ayuda que la humedad se reduzca a un 9%, y así enviar al mercado para que sea comercializado.

Imagen N° 1-11: “Mineroducto de transporte de mineral Los Bronces”.

Fuente: Ausenco.

1.3.5. Minera El Teniente:

La minera El Teniente es una mina que se explota por método subterráneo, está ubicada en la VI región del Libertador General Bernardo O'Higgins, específicamente en la comuna de Machalí (Imagen N° 1-12). La minera El Teniente como principal producto elabora concentrado de cobre, lo que finalmente, luego de varios procesos, se realiza la comercialización de los ánodos de cobre.

Como producto secundario, la mina El Teniente desarrolla las labores adecuadas para trabajar también con Molibdeno. A su vez, la mina produce también, ácido sulfúrico.

Imagen N° 1-12: "Ubicación de la Minera El Teniente".

Fuente: Consejo Minero.

La minera El Teniente realiza labores a través del método de explotación de Panel Caving, lo que quiere decir que es hundimiento por paneles.

Una vez que el mineral es explotado y fracturado, es trasladado mediante equipos LHD hacia los puntos de vaciado, en los cuales existen martillos hidráulicos, que cumplen la función de disminuir el tamaño de las rocas gigantes.

Posteriormente, en el nivel de transporte de la mina, el mineral es trasladado a través de un ferrocarril hacia la superficie hacia el proceso de concentración, para realizar la flotación del mineral y así, aumentar su concentración de Cobre y Molibdeno, respectivamente.

En el siguiente proceso, el mineral es filtrado para extraer la humedad al mineral, lo que es trasladado mediante cintas transportadoras al proceso de fusión, para obtener finalmente cobre anódico.

Minera El teniente emplea dos tipos de transporte para el proceso del mineral, los cuales son el ferrocarril (Imagen N° 1-13) y las cintas transportadoras. El primero hacia la flotación, y el segundo hacia la fundición, respectivamente.

Imagen N° 1-13: “Ferrocarril utilizado en El Teniente”.

Fuente: Portal Minero.

A partir de los métodos de transporte estudiados de cada una de las grandes mineras entre la IV y VI región del país, se muestra a continuación la Tabla N° 1-2, que nos ayuda a descifrar con mayor claridad cada uno de los métodos utilizados por cada una de las mineras vistas y el tipo de medio que a esto pertenece.

Tabla N° 1-2: Cuadro resumen del medio transporte minero.

MINERA	MEDIO DE TRANSPORTE UTILIZADO	TIPO DE MEDIO
Los Pelambres	Concentraducto	Continuo
El Soldado	Camiones	Discontinuo
Andina	Ferrocarril	Discontinuo
Los Bronces	Concentraducto	Continuo
Teniente (1)	Ferrocarril	Discontinuo
Teniente (2)	Cintas Transportadoras	Continuo

Fuente: Elaboración propia a partir de los medios de transporte investigados.

CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

2. GEOTECNIA DE SUELOS

La geotecnia de suelos se basa en principios geológicos de investigación sobre los materiales naturales, como lo son las rocas en este caso, las cuales forman parte de la corteza terrestre y son fundamentales para el diseño y construcción de carreteras, vías ferroviarias, presas, puentes, oleoductos, acueductos, concentra ductos, edificios, etc.

Es importante saber en las condiciones en las cuales las rocas fueron creadas, para así darles una correcta clasificación, su edad y los posteriores procesos estructurales sufridos por estas, ya sean metamórficos, de sustitución, de plegamientos o fallamientos, entre otros. Además de conocer los riesgos a los que están expuestos los suelos directamente, como las condiciones climáticas del sector, las que pueden afectar en los deslizamientos del terreno, en hundimientos de tierra, flujos de lodos y caída de rocas.

2.1. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO

Las propiedades geotécnicas del suelo son imprescindibles al momento de realizar algún proyecto de construcción tales como carreteras, puentes, ferrocarriles, presas, oleoductos (Imagen N° 2-14) ya que estos proyectos utilizan el suelo como material principal para soportar el peso de las estructuras de apoyo. Por ende, estas propiedades incluyen tanto las características físicas como químicas que constituye el ámbito del suelo.

Imagen N° 2-14: "Excavadora realizando un oleoducto".

Fuente: Shvadchak Vasyl

2.1.1. Características del suelo

Las características específicas de un suelo se basan principalmente en las propiedades de las rocas originarias del suelo en el lugar. Una de las más comunes es la meteorización, provocando la degradación o descomposición de la roca originaria del lugar, provocada principalmente por los fenómenos climáticos ambientales, como son el viento y la lluvia. La adherencia del suelo es fundamental para que así se mantenga unido y con ello tenga una buena compactación o juntura superficial.

Esta característica depende de factores ambientales, como son: la cantidad de agua presente en él, el aire y, por último, la materia orgánica que se encuentra en el lugar de la superficie en estudio. La cohesión también depende de los tipos de partículas que componen el suelo, las cuales pueden ir apareciendo como minerales de arena, limo, limo fluvial, arcilla, etc.

2.1.2. La consistencia del suelo

La consistencia de las propiedades del suelo se refiere a la cualidad que resiste este frente a estructuras de soporte, a la firmeza que se forma con la cohesión de los materiales que componen a este mismo. La resistividad del suelo se determina en términos de cantidad de aire y la presencia de material líquido o sólido. Las partículas se pueden ir apareciendo de distintos tamaños y formas, las cuales poseen diferentes formas de absorber el agua y el aire. Geotécnicamente hablando, los suelos se diferencian según su plasticidad o capacidad que tiene este para moldearse.

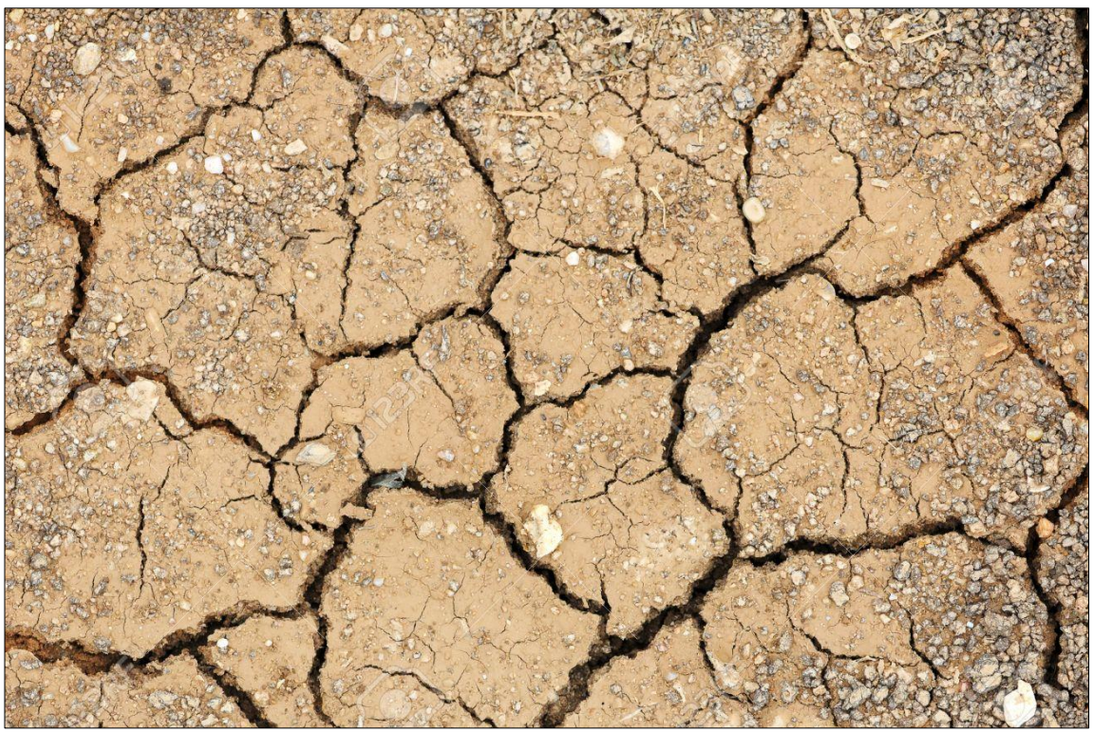
Con plasticidad se refiere al contenido de agua del suelo y cómo se comporta este a distintos niveles de agua. Esta misma se establece midiendo la cantidad de agua que se necesita para transformar el ámbito del suelo en un material líquido o sólido. Las propiedades de plasticidad varían de acuerdo con los tipos de partículas presentes en el suelo, es decir, que las partículas de grano fino tienen mayor plasticidad y las partículas de arena tienen la más baja.

2.1.3. Fuerza del suelo

La fuerza del suelo es la capacidad de éste, para mantener su forma original cuando se le aplica peso. También es llamada resistencia de suelo. Los factores que afectan a la resistencia del suelo hacen referencia al tamaño de las partículas del suelo, así también como el agua y el contenido del aire presente en él.

Los suelos que tienen una tendencia a la humedad, tales como arcilla, o también los suelos orgánicos, tienden a agrietarse, quedando una especie de rompecabezas en el suelo (Imagen N° 2-15). Finalmente, producto del medio ambiente, la humedad del suelo se evapora, quedando el suelo totalmente seco en su superficie. A partir de la geotécnica, los suelos con tendencia a la humedad son considerados débiles en cuanto a la capacidad de soportar alguna carga o estructura.

Imagen N° 2-15: "Suelo arcilloso agrietado".



Fuente: Olga Kovalenko.

2.2. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LAS COMUNAS

2.2.1. PUCHUNCAVÍ:

Ubicación: La Comuna de Puchuncaví limita al norte con la comuna de Zapallar, al sur con las comunas de Quillota y Quintero. Se ubica en la V región de Valparaíso.

Tabla N° 2-3: Características geotécnicas del suelo de Puchuncaví.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de terraza marina, plano a ligeramente ondulado.	Arenas marinas con material intrusivo rico en cuarzo.	Altamente susceptible a la erosión.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

Tabla N° 2-4: Características geotécnicas del suelo de Puchuncaví, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 15	Suelo de color pardo rojizo, de textura arenosa y de material blando.
15 – 50	Suelo de color pardo rojizo oscuro, de textura arenosa y material duro.
50 – 90	Suelo de color pardo oscuro, de textura arcillosa y material muy firme.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

- Clima: El clima de la comuna corresponde a una zona templada cálida, con precipitaciones concentradas en los meses de invierno.

- Pluviometría: Del área: 400 a 500 mm. Local: 405 mm.

2.2.2. QUINTERO:

Ubicación: La comuna de Quintero se ubica por camino a Ventanas, al oeste de la comuna de Loncura, en la V región de Valparaíso.

Tabla N° 2-5: Características geotécnicas del suelo de Quintero.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de terrenos de dunas.	Arenas con material rico en cuarzo sobre terrazas marinas.	Expuesto a erosión eólica.

Fuente: Elaboración propia mediante documento “suelos”.

Tabla N° 2-6: Características geotécnicas del suelo de Quintero, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 50	Suelo de color pardo oscuro, de textura arenosa y de material débil.
50 - 100	Suelo de color pardo amarillento oscuro, de textura arenosa y material débil.

Fuente: Elaboración propia mediante documento “suelos”.

- Clima: El clima de Quintero se clasifica como cálido y templado. La lluvia en Quintero cae sobre todo en el invierno.

- Pluviometría: Alrededor de 500 mm.

2.2.3. QUILLOTA:

Ubicación: La Comuna de Quillota limita al norte con la comuna de La Calera, al sur del río Aconcagua por camino Concón. Se ubica en la V región de Valparaíso.

Tabla N° 2-7: Características geotécnicas del suelo de Quillota.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de terraza marina, plano a ligeramente ondulado.	Arcilla sobre material rico en cuarzo.	Libre de erosión.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

Tabla N° 2-8: Características geotécnicas del suelo de Quillota, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 25	Suelo de color pardo rojizo oscuro, de textura franca y de material arcilloso.
25 – 50	Suelo de color pardo oscuro, de textura arcillosa y material firme.
50 – 110	Suelo de color gris rojizo oscuro, de textura arcillosa y material muy firme.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

- Clima: El clima en Quillota es cálido y templado. La lluvia en Quillota cae sobre todo en el invierno, con relativamente poca lluvia en el verano.

- Pluviometría: Alrededor de 500 mm.

2.2.4. LA CALERA:

Ubicación: La Comuna de La Calera limita al norte con la comuna de Nogales, al sur de Quillota por camino a Valparaíso. Se ubica en la V región de Valparaíso.

Tabla N° 2-9: Características geotécnicas del suelo de La Calera.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de terraza arcillosa, con micro relieve.	Limo fluvial, más fino que la arenisca y más grueso que la arcilla.	Libre de erosión.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

Tabla N° 2-10: Características geotécnicas del suelo de La Calera, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 20	Suelo de color gris muy oscuro, de textura arcillosa limosa y material débil.
20 – 40	Suelo de color pardo muy oscuro, de textura franco arcillosa y material medio.
40 – 90	Suelo de color pardo grisáceo muy oscuro, de textura franca y material firme.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

- Clima: El clima es cálido y templado en La Calera. En invierno hay en La Calera mucha más lluvia que en verano.

- Pluviometría: Del área: 400 a 500 mm. Local: 402 mm.

2.2.5. HUALCAPO:

Ubicación: Es una comuna y ciudad de Chile de la Provincia de Quillota, se encuentra ubicado al sur de Hijuelas. Se encuentra en la V región de Valparaíso.

Tabla N° 2-11: Características geotécnicas del suelo de Hualcapo.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de plano arenoso, ligeramente ondulado.	Arena de roca intrusiva pobre en cuarzo.	Libre de erosión.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

Tabla N° 2-12: Características geotécnicas del suelo de Hualcapo, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 70	Suelo de color pardo grisáceo muy oscuro, de textura arenosa muy fina.
70 – 100	Suelo de color pardo muy oscuro, de textura arenosa muy fina.
100 – 120	Suelo de color pardo muy oscuro, de textura arenosa gruesa.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

- Clima: El clima es templado y cálido en Hualcapo. La lluvia en el sector cae sobre todo en el invierno, con relativamente poca lluvia en el verano.

- Pluviometría: Del área: 300 a 400 mm. Local: 300 mm.

2.2.6. LLAY - LLAY:

Ubicación: La comuna de Llay-Llay limita al sur con la comuna de Santiago, se encuentra ubicada en la región de Valparaíso, específicamente en la provincia de San Felipe.

Tabla N° 2-13: Características geotécnicas del suelo de Llay Llay.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de plano arenoso, ligeramente ondulado.	Arcilla fluvial.	Libre de erosión.

Fuente: Elaboración propia mediante documento “suelos”.

Tabla N° 2-14: Características geotécnicas del suelo de Llay Llay, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 20	Suelo de color pardo rojizo oscuro, de textura arcillosa y material débil.
20 – 60	Suelo de color pardo rojizo oscuro, de textura arcillosa y material medio.
60 – 110	Suelo de color pardo rojizo oscuro, de textura arcillosa y material moderado.

Fuente: Elaboración propia mediante documento “suelos”.

- Clima: El clima en Llay Llay se conoce como un clima de estepa local. A lo largo del año, dan pocas precipitaciones en Llay Llay.

- Pluviometría: Del área: 300 a 400 mm. Local: 300 mm.

2.2.7. PANQUEHUE:

Ubicación: La comuna de Panquehue limita al poniente de San Felipe, se encuentra ubicado en la región de Valparaíso, específicamente en la provincia de San Felipe.

Tabla N° 2-15: Características geotécnicas del suelo de Panquehue.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de plano arcilloso, ligeramente ondulado.	Limo fluvial.	Libre de erosión.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

Tabla N° 2-16: Características geotécnicas del suelo de Panquehue, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 20	Suelo de color gris muy oscuro, de textura arcillosa y material moderado.
20 – 45	Suelo de color negro, de textura arcillosa y material duro.
45 – 70	Suelo de color pardo grisáceo oscuro, de textura franca y material duro.
70 – 250	Suelo de color rojo amarillento, de textura franca, material rico en cuarzo.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

- Clima: En Panquehue, se encuentra el clima de estepa local. Hay pocas precipitaciones durante todo el año.

- Pluviometría: Del área: 250-300 mm. Local: 270 mm.

2.2.8. LOS ANDES:

Ubicación: La comuna de Los Andes limita al este con la ciudad de Mendoza (Argentina) y al oeste con la comuna de San Felipe. Se encuentra ubicada en la región de Valparaíso, específicamente en la Cuenca de Los Andes.

Tabla N° 2-17: Características geotécnicas del suelo de Los Andes.

Geomorfología	Material de origen	Erosión
Suelo de plano arcilloso, ligeramente ondulado.	Limo fluvial.	Libre de erosión.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

Tabla N° 2-18: Características geotécnicas del suelo de Los Andes, según profundidad.

[cm]	Características del suelo según profundidad
0 – 20	Suelo de color pardo oscuro, de textura franca y material débil.
20 – 55	Suelo de color pardo rojizo oscuro, de textura arcillosa y material débil.
55 – 100	Suelo de color pardo rojizo oscuro, de textura arcillosa y material moderado.

Fuente: Elaboración propia mediante documento "suelos".

- Clima: El clima en Los Andes se conoce como un clima de estepa local. A lo largo del año, dan pocas precipitaciones en Los Andes.

- Pluviometría: Área: 300 a 400 mm. Local: 250 mm.

A partir de las ciudades estudiadas, podemos desprender a grandes rasgos que mientras más profundo sea el estudio, el suelo se va presentado con mayor dureza, independientemente la ciudad que esto involucre.

Por otro lado, respecto al clima de las ciudades estudiadas se puede concluir que son similares, ya que en general las distancias entre ellas no soy muy grandes, por lo que la mayoría se caracteriza en un clima cálido con precipitaciones de vez en cuando.

En cuanto a la pluviometría señalada en cada uno de los sectores, podemos mencionar que son rangos parecidos, esto se explica de manera que todas las ciudades no poseen grandes distancias de separación entre ellas y todas se mantienen en una región definida a lo largo del país, lo que conlleva a que no sean cifras tan elevadas entre una y otra.

CAPÍTULO 3: CÁLCULOS OPERACIONALES PARA UN SISTEMA DE TUBERÍAS

3. SISTEMA DE TUBERIAS

Para diseñar un sistema de tubería que satisfaga las condiciones mínimas para el traslado de algún fluido, se deben realizar diversos cálculos tales como: caudal, diámetro de la tubería, velocidad, viscosidad, número de Reynolds, pérdidas de carga, entre otros.
Uno de los aspectos a considerar es la velocidad que alcanza el fluido dentro de la tubería, la cual viene determinada por el caudal y diámetro de la sección interna del ducto, la cual no debe superarse porque puede tener características asociadas.
Existen muchas variables que influyen dentro de las características del material al igual que su diámetro, por lo que en este caso obtendremos el material de la tubería y su respectivo diámetro a partir de la tabla N° 1-19 adjunta. En este caso, CODELCO División Andina reduce a una granulometría de 0,18 mm equivalentes a 180 micrones.

Tabla N° 3-19: Cuadro resumen de información recopilada. La interpretación de los valores de velocidades límites no es exacta debido a que proviene de operaciones industriales.

Diámetro tubería (mm)	Material tubería	Concentración en peso (%)	Diámetro partículas (μ)	Velocidad flujo (m/s)
187,6	H.D.P.	60	250	~ 2,3
187,6	H.D.P.	65	230	-
144	Acero rev. en goma	70	180	< 2,0
144	Acero rev. en goma	70	165	-
155	Acero	70	125	> 1,5
422	H.D.P.	52	90	< 1,8
422	H.D.P.	48	80	-
469	H.D.P.	48	80	>1,8
419	H.D.P.	48	80	~ 1,8
558,6	H.D.P.	48	80	~ 2
438,15	Acero	45	37	< 1,7
434,9	Acero	45	37	< 1,7

Fuente: Hidráulica de pulpas de relaves.

Teniendo un diámetro de partícula de 180 micrones desprendemos de la tabla que el diámetro de la tubería sería de 144 milímetros y el material de esta misma seria de acero API 5L grado x70 revestido interiormente en goma, el cual posee una protección eficaz contra la corrosión de agentes químicos, oxidación y también para dar una resistencia al impacto mecánico hacia los ductos. Con un espesor designado de 50 mm en base a los criterios de la norma API 5L.

3.1. CÁLCULO DEL FLUJO DE PULPA TRANSPORTADA

Actualmente la minera Andina maneja estos valores.

Tabla N° 3-20: Datos del concentrado de cobre.

Producción de concentrado de cobre	2550 [ton/día]
Densidad de concentrado de cobre	2,3 [ton/m^3]

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados.

Para formar la pulpa se le agregará a la masa del concentrado, un 65 por ciento de agua.

$$\text{Cantidad de Agua} = \frac{65}{100} * 2550\ [\text{ton/día}]$$

$$\text{Cantidad de Agua} = 1657{,}5\ [\text{ton/día}]$$

Ahora para formar el flujo volumétrico, se sumará el volumen del concentrado con el volumen del agua, y para eso se dividirá cada uno con su densidad respectiva.

$$\text{Caudal (Q)} = \frac{2550\ [ton/día]}{2{,}3\ [ton/m^3]} + \frac{1657{,}5\ [ton/día]}{1\ [ton/m^3]}$$

$$\text{Caudal (Q)} = 1108{,}7\ [\text{m}^3/\text{día}] + 1657{,}5\ [\text{m}^3/\text{día}]$$

$$Q = 2766{,}2\ [\text{m}^3/\text{día}]$$

Tabla N° 3-21: Valores calculados a partir de los datos de la tabla anterior.

Volumen de concentrado	1108,7 [m^3/día]
Volumen de Agua (65%)	1657,5 [m^3/día]
Volumen de Pulpa Total	2766,2 [m^3/día]
Densidad de Pulpa	1,52 [ton/m^3]

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados anteriores.

3.2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA PULPA TRANSPORTADA

Con el caudal ya determinado, y el diámetro mínimo recomendado determinamos la velocidad máxima la cual se calculará dividiendo el caudal con el área de la tubería:
Teniendo en cuenta que: Q = 0,032 [m^3/s] y D = 0,144 [m].

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{(0{,}144\text{m})^2 * \pi}{4} = 0{,}0163\ [\text{m}^2]$$

$$\nu = \frac{Q}{A} = \frac{0{,}032\ [\text{m}^3/\text{s}]}{0{,}0163\ [\text{m}^2]} = 1{,}96\ [\text{m/s}]$$

Las velocidades más bajas son las más utilizadas sobre todo cuando el flujo es por gravedad desde estanques en altura.

3.3. CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DE LA PULPA

Es la propiedad de los fluidos para resistirse frente a la deformación, producto de un esfuerzo cortante. En este caso, utilizaremos la ecuación de Wellman (1997) tras experiencias con relaves chilenos, la cual depende solamente del parámetro de concentración volumétrica del sólido (Cv).
La concentración volumétrica de los sólidos se determina dividiendo el flujo volumétrico del mineral con el flujo volumétrico de la pulpa luego se multiplica todo por 100, tal como se muestra a continuación.

$$Cv = \frac{1108{,}7\ [\frac{\text{m}^3}{\text{día}}]}{2766{,}2\ [\frac{\text{m}^3}{\text{día}}]} \cdot 100 = 40{,}08\ \%$$

Teniendo en cuenta que Cv = 40,08% y μ_{agua} = 0,001 [Pa·s] a 20°C.

$$\mu_{pulpa} = \frac{e^{(-10,4 * Cv)}}{\left(1-\frac{Cv}{0,62}\right)^{8}} * \mu_{agua}$$

$$\mu_{pulpa} = \frac{e^{(-10,4 * 0,4008)}}{\left(1-\frac{0,4008}{0,62}\right)^{8}} * 0,001 \text{ [Pa·s]}$$

$$\mu_{pulpa} = 0,063 \text{ [Pa·s]}$$

3.4. CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds (Re), se utiliza para estudiar el movimiento de un fluido (en este caso, pulpa de concentrado de cobre) cuando es transportado de un lugar a otro. El número de Reynolds depende de rangos establecidos, los cuales nos dicen cuando el flujo es laminar, turbulento o, también, cuando es de transición. A continuación, se muestran los rangos que van establecidos en la siguiente tabla:

Tabla N° 3-22: Valores Re y Tipos de flujos.

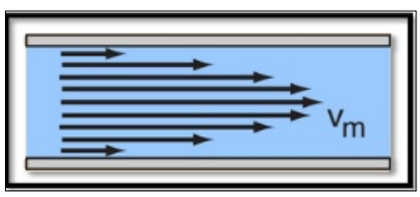
Rango establecido	Tipo de flujo
Si R < 2000	Flujo laminar
Si R > 4000	Flujo turbulento
Si 2000 < R < 4000	Flujo en transición

Fuente: Elaboración propia según Libro Mecánica de Fluidos.

3.4.1. TIPOS DE FLUJOS:

3.4.1.1. Flujo laminar: Como su nombre lo dice, el fluido se va trasladando en forma de láminas hacia su destino. Es decir, se mueve de manera ordenada, y las moléculas van cada una en forma paralela en su traslado, tal como muestra la siguiente imagen:

Imagen N° 3-16: “Flujo laminar”.



Fuente: Slideshare.

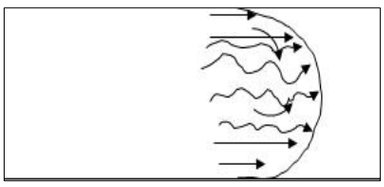
3.4.1.2. <u>Flujo turbulento:</u> Es cuando el fluido a transportar se comporta de manera caótica en el traslado hacia su destino. A su vez, las moléculas trasladadas van desplazándose de una manera desordenada y así, forman pequeños remolinos que no van coordinados, tal como muestra la siguiente imagen:

Imagen N° 3-17: "Flujo turbulento".

Fuente: Slideshare.

3.4.1.3. <u>Flujo en transición:</u> En palabras simples, el flujo en transición es como una "fusión" entre los dos flujos anteriormente nombrados. Es decir, hay oscilaciones intermitentes en un flujo laminar, pero a su vez, no alcanzan a caracterizarlo como un flujo turbulento, tal como lo muestra la siguiente imagen:

Imagen N° 3-18: "Flujo en transición".



Fuente: Perfo Blogger.

El número de Reynolds es un número adimensional. La fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

Donde:

- Re: Número de Reynolds
- D: Diámetro de la tubería [m]
- V: Velocidad de desplazamiento del fluido [m/s]
- ρ: Densidad del fluido [kg/m^3]
- μ: Viscosidad dinámica [Pa·s]

Teniendo en cuenta que:

- D: 0,144 [m]
- V: 1,96 [m/s]
- ρ: 1530 [kg/m^3]
- μ: 0,063 [Pa·s]

$$Re = \frac{0{,}144\ [m] * 1{,}96\ \left[\frac{m}{s}\right] * 1530\ [\frac{kg}{m3}]}{0{,}063\ [Pa*s]}$$

$$Re = 6854{,}4$$

A partir del valor calculado anteriormente, nos da como resultado un flujo turbulento, el cual resulta un flujo desordenado, es decir, las partículas de la pulpa se trasladan de manera caótica hasta llegar a su destino.

3.5. FACTOR DE FRICCIÓN

El factor de fricción sirve para calcular las pérdidas de carga que tendrá el fluido a transportar, ya que estas últimas se originan mediante la fricción que provoca el fluido con la tubería que traslada la pulpa de cobre.
En un flujo laminar el factor de fricción depende solamente del número de Reynolds. En cambio, para un flujo turbulento se toma en cuenta tanto el número de Reynolds como la rugosidad relativa, que en este caso desprenderemos de la siguiente tabla:

En este caso calcularemos el factor de fricción en un flujo turbulento con la ecuación de Haaland:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6{,}9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3{,}7}\right)^{1{,}11}\right]$$

Donde:

- *f*: Factor de fricción.
- Re: Número de Reynolds.
- Ɛ: Rugosidad relativa. (Tabla N° 3-23)
- D: Diámetro.

El valor de la rugosidad relativa lo desprenderemos de la tabla siguiente:

Tabla N° 3-23: Valores de la rugosidad relativa.

	Rugosidad, ε	
Material	ft	mm
Vidrio, plástico	0	0
Concreto	0.003–0.03	0.9–9
Duela de madera	0.0016	0.5
Hule, alisado	0.000033	0.01
Tubería de cobre o latón	0.000005	0.0015
Hierro fundido	0.00085	0.26
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Hierro pudelado	0.00015	0.046
Acero inoxidable	0.000007	0.002
Acero comercial	0.00015	0.045

Fuente: Mecánica de fluidos, Robert Mott.

De acuerdo con los valores ya obtenidos, se procede a calcular el factor de fricción establecido.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6,9}{6854,4} + \left(\frac{0,000045/0,144}{3,7} \right)^{1,11} \right]$$

$$f = 0,035$$

3.6. PÉRDIDAS DE CARGA

Las pérdidas de carga se producen cuando se traslada un fluido por el interior de una tubería, ya que el fluido (en este caso pulpa de cobre) va causando una fricción con las paredes internas del tubo, que provocan principalmente pérdida de presión en el trayecto. Cabe mencionar, que las pérdidas de carga se presentan aún más en tramos de ductos de harta distancia, las cuales son inevitables y es por ello, que cada cierta etapa se colocan bombas para impulsar el fluido y así, provocarle una presión mayor al flujo transportado.

Para el cálculo de las pérdidas de carga en un flujo turbulento, se establece la siguiente fórmula:

$$H_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v2}{2g}$$

Donde:

- H_L: Pérdida de carga debido a la fricción [m].
- *f:* Factor de fricción [adimensional].
- L: Largo del tramo [m].
- D: Diámetro de la tubería [m].

- v: Velocidad del flujo [m/s].
- g: Aceleración de gravedad [m/s^2].

$$H_L = 0{,}035 \cdot \frac{142000\ [m]}{0{,}144\ [m]} \cdot \frac{(1{,}96\ [m/s])^2}{2 \cdot 9{,}81\ [m/s^2]}$$

$$H_L = 6757{,}83\ [m]$$

Esta pérdida de energía total calculada que se produce en el fluido producto de la fricción de las partículas entre sí y contra las paredes internas del ducto. Es un largo equivalente, que genera una resistencia la cual se debe vencer, por ende, los 6295,98 metros obtenidos debo considerarlos en mi sistema de tuberías, para el traslado del fluido de un punto a otro.

3.7. ECUACIÓN DE BERNOULLI

Si bien se conoce que para que circule un fluido, en este caso pulpa de cobre, a través de una tubería, debe de existir una fuerza que lo impulse la cual se hace llamar presión. El fluido cuando se mueve a través de la tubería ya sea por gravedad o inercia, se genera un incremento en la presión, la cual al ser estudiada por la dinámica de fluidos dependerá de la energía cinética, energía potencial y el flujo de energía, los cuales están presentes en cada fluido.

La ecuación de Bernoulli está basada en el principio de conservación de la energía y es fundamental para tomar en cuenta los cambios en estos tres tipos de energía en un sistema. Esta misma, toma en cuenta los cambios en la presión, velocidad y altura entre dos puntos en un sistema de flujo.

La fórmula es: $\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\upsilon_1^2}{2g} + z_1 + H_{bba} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\upsilon_2^2}{2g} + z_2 + H_L$

Donde:

- P: Presión [Pa].
- γ: Peso específico = ρ·g [N/ m^3].
- υ: Velocidad del fluido en la sección [m/s].
- g: Aceleración de gravedad [m/s^2].
- z: Altura en dirección de la gravedad desde una cota de referencia [m].
- Hbba: Altura dinámica (carga de trabajo de la bomba)
- H_L: Pérdidas de carga [m]

Teniendo en cuenta que el estanque se encuentra abierto a la atmósfera la presiones (P_1 y P_2) se anulan, ya que serían igual a la presión atmosférica. Además, las velocidades (υ_1 y υ_2) al tener el mismo valor, no se consideran en el cálculo.

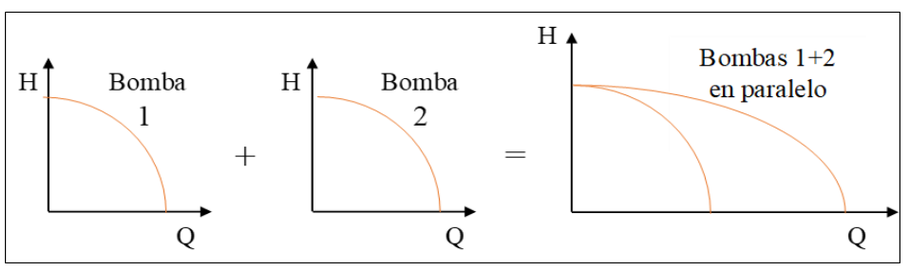
Quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$Hbba = (Z_2 - Z_1) + H_L$$
$$Hbba = (13-1532) + 6295,98$$
$$Hbba = 5238,83 \text{ [m]}$$

Este valor obtenido nos indica que necesitamos un equipo de bombeo que tenga características de 115,3 m^3/hr y un Hbba de 5238,83 metros columna de agua.

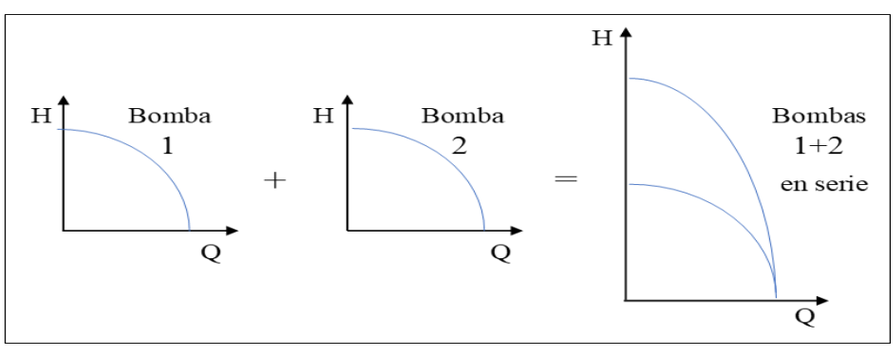
El requerimiento de carga que se necesita es excesivamente alto, por lo cual será necesario utilizar un sistema de bombeo con más de una bomba. Existen dos tipos de sistemas en el que pueden ser operadas las bombas, en serie y en paralelo. A simples palabras la operación en paralelo de bombas (Imagen N° 3-19) se utiliza cuando la demanda de capacidad es mayor, ya que, al sumarse todos los caudales de las bombas, el caudal (Q) aumentará, mientras que la carga máxima (H) se mantendrá. En cambio, las en serie (Imagen N° 3-20) se utilizan para proporcionar cargas mayores, ya que se suman las cargas de todas las bombas (H) y la capacidad máxima (Q) sigue siendo la misma de la que una sola bomba.

Imagen N° 3-19: Sistema de bombas en paralelo.



Fuente: Elaboración propia.

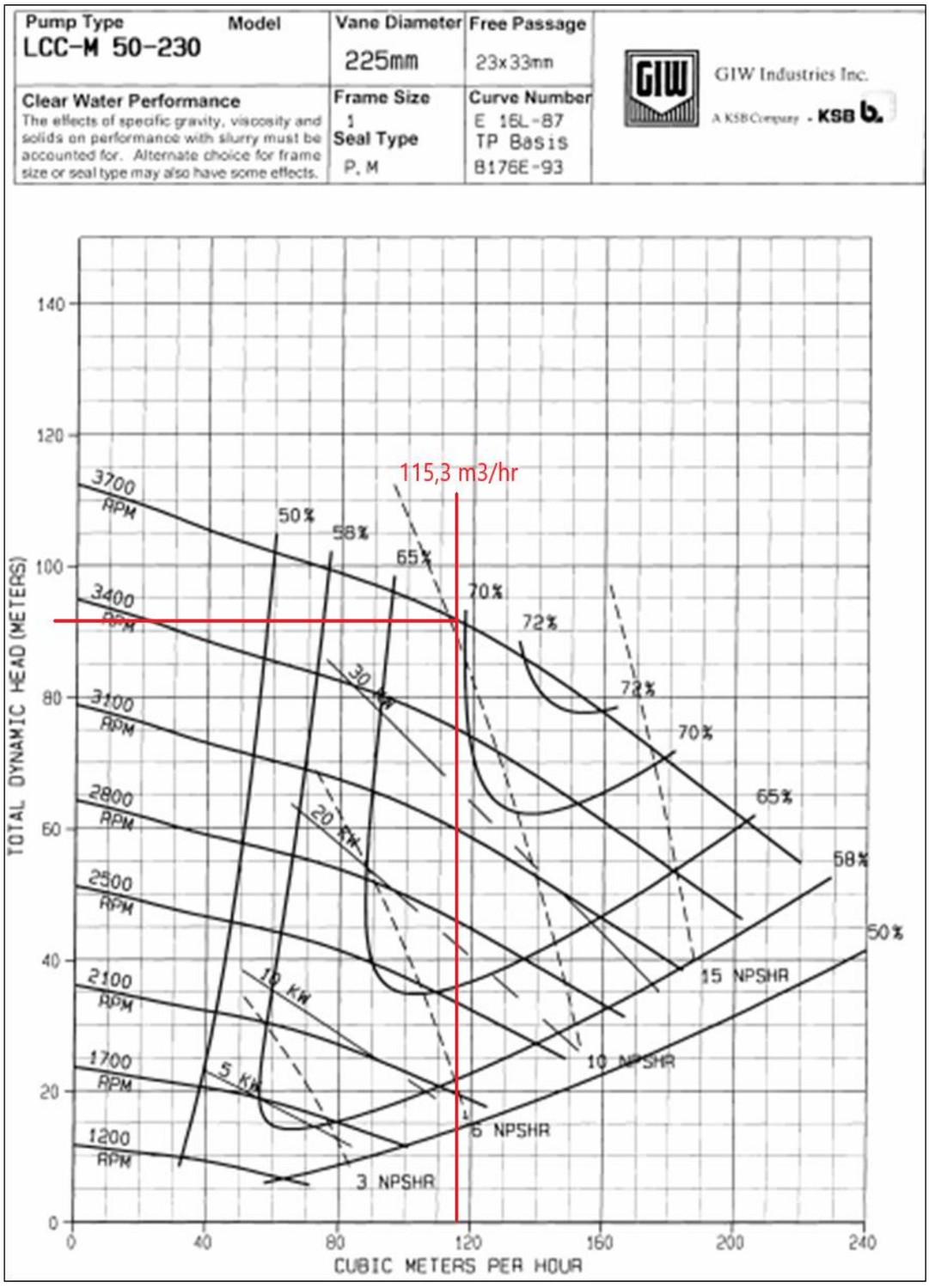
Imagen N° 3-20: Sistema de bombas en serie.



Fuente: Elaboración propia.

Por ende, si ocupásemos la bomba KSB Modelo LCC-M que fue diseñada para aplicarse en instalaciones mineras o industriales que estén expuestas a altas abrasiones y pulpas de altas densidades. Se necesitarían 58 bombas en serie para suplir la carga dinámica total requerida. Ya que en su ficha técnica (Imagen N° 3-21) la altura máxima de bombeo es de 90 metros columna de agua por ende al ponerlas en serie se va aumentando el TDH. Quedando así un total de 58 bombas.

Imagen N° 3-21: Ficha técnica bomba KSB Modelo LCC-M.



Fuente: KSB.

CONCLUSIÓN

Con el estudio realizado, que fue proponer una alternativa a la Mina Andina para modificar el actual método de traslado de mineral, con el fin de mejorar o eliminar los aspectos negativos del ferrocarril. Tales como la contaminación, la distancia de 169 kilómetros que está limitada por una velocidad máxima de 40 km por hora, el ruido que genera este al llegar a cada cruce, el cual está catalogado por norma como ruido molesto ya que sobrepasa los 55 decibeles, y sobre todo el índice de accidentes que presentó este mismo.

Se determinó que transportar la pulpa a través de una tubería sería una alternativa más segura que disminuiría los impactos ambientales como incomodidades a las poblaciones situadas en las cercanías de la línea férrea. Y entre sus otras ventajas también estarían los bajos niveles de contaminación, los costos nulos de combustibles y el poco requerimiento de personal.

La alternativa propuesta ofrece una solución sustentable en muchos aspectos por lo que se realizó una caracterización de las comunas para conocer las características geotécnicas del suelo y las climatológicas con el fin de entender la morfología del terreno para la posible futura obra a diseñar.

Además, se dio a conocer todos los medios de transportes de mineral que existen y las que actualmente usan las mineras de la IV A VI región. Destacando el medio de transporte continuo ya que este puede realizar su labor 24 horas los 7 días de la semana y está constantemente en funcionamiento. En cambio, los medios discontinuos hacen referencia a los medios de transporte que no son constantes y generan tiempos muertos para la empresa en la vuelta al no llevar el cargamento.

Finalmente, con los cálculos realizados, para un sistema de tubería que satisfaga las condiciones mínimas de traslado, se concluye que el transporte por un concentra ducto sería factible y beneficioso en varios aspectos nombrados anteriormente, como también para futuros requerimientos de producción.

RECOMENDACIONES

1) Se sugiere invertir en este proyecto ya que como se sabe generalmente los ductos son costosos en cuanto a inversión, pero poseen bajos costos de operación. Además, que el hecho que sea un sistema que no requiera personal y sea automático, lo hace más seguro respecto al ferrocarril. Y al operar en un compartimiento cerrado, no se ve afectado directamente por las condiciones climáticas ni están expuestos a los accidentes comúnmente ocurridos en las líneas férreas.

2) Se recomienda instalar las bombas a una cierta distancia y así no afectar la integridad mecánica de cada una, y así se vaya supliendo la pérdida de carga de estas mismas.

3) Otra recomendación sería que el trayecto en vez de utilizar un sistema de bombeo en serie para trasladar el fluido completo desde un estanque al inicio y otro al final, se creen estaciones de no tan larga distancia poniendo estanques. Así se evitaría la gran cantidad de bombas necesarias para trasladar toda la pulpa. Ya que en cada zona de elevación iría una bomba y esta ayudaría a bombear el fluido contrarrestando la altura y en las pendientes de descenso solo actuaría la gravedad, trasladándose de estanque a estanque. Siendo un ahorro en cuanto al número de bombas y también por un tema se seguridad.

4) Para evitar la cavitación tenemos que asegurarnos que la presión en cualquier punto de la bomba sea mayor a la presión de vapor. Ya que se sabe que el agua puede pasar a vapor, cuando la temperatura aumenta, pero también si la presión baja. Por ende, hay que prevenir que el NPSH necesario (Carga de aspiración neta positiva mínima para evitar la cavitación en la bomba) esté por debajo del NPSH disponible. Y para esto se debe respetar los límites de capacidad de succión vertical indicados en la ficha técnica de cada bomba a través de las curvas características. En concreto para evitar la cavitación en este proyecto las bombas utilizadas poseen un valor de 10 metros de carga de aspiración neta positiva requerida por lo que el NPSH disponible debe ser mayor a ese valor para que así el agua de la pulpa del mineral no se evapore y próximamente produzca daños en el equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alberto, P. (2010). Antecedentes Minera Los Pelambres [en línea]. Sitio web: <https://es.scribd.com/doc/45080484/Antecedentes-Minera-Los-Pelambres> [Consulta: 03 marzo 2019].

2. Instituto de Investigación de Recursos Naturales CORFO. (1964). SUELOS. Descripciones del Proyecto Aerofotogrametrico [en línea]. Sitio web: <http://www.plataformacaldera.cl/biblioteca/589/articles-66458_documento.pdf> [Consulta: 29 enero 2019].

3. José De Echave. (2013). Mineroducto del Proyecto Minero Las Bambas [en línea]. Sitio web: <http://cooperaccion.org.pe/content/uploads/2015/07/Cartilla_Mineroducto_Las Bambas_2013-Jun.pdf> [Consulta: 03 febrero 2019].

4. Ernesto Vargas. (2001). Estación Río Blanco. 2001 [en línea]. Sitio web: <https://www.amigosdeltren.cl/estacion-rio-blanco?fb_comment_id=1536483453054293_1608956229140348#f12898c60ab6948> [Consulta: 04 marzo 2019].

5. Nicolás Osses. (2016). Codelco, División Andina [en línea]. Sitio web: <https://prezi.com/gsm87y2jzwpn/codelco-division-andina/> [Consulta: 15 enero 2019].

6. Alex Rojas. (2012). Transporte por Ductos [en línea]. Sitio web: <https://es.slideshare.net/alvin_palos/transporte-por-ductos-14809803> [Consulta: 26 febrero 2019].

7. Nicolás Sepúlveda. (2010). Suelos V región de Valparaíso [en línea]. Sitio web: <https://es.slideshare.net/sepulvedan/suelos-v-region-de-valparaiso> [Consulta: 01 enero 2019].

8. José Miguel Aliaga. (2012). Hidrometalurgia [en línea]. Sitio web: <https://es.slideshare.net/JoseMiguelAliaga/hidrometalurgia-14225553> [Consulta: 28 diciembre 2019].

9. Iván Cerda. (2010). Caracterización de Pulpas [en línea]. Sitio web: <http://www.sonami.cl/images/stories/pdf/Caracterizacion_de_Pulpas.pdf > [Consulta: 15 marzo 2019].

10. Ray Martinson. (2012). Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas [en línea]. Sitio web: <http://www.dosso.cl/fm_weblogin/pdf/5-ray.pdf> [Consulta: 20 marzo 2019].

11. Javier Besio. (2014). Caracterización del Transporte de Pulpa de Cobre en Tuberías, mediante simulación [en línea]. Sitio web: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115603/cf-besio_jf.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consulta: 03 marzo 2019].

12. Juan Palma. (2007). Declaración Impacto Ambiental Proyecto Modificación Mineroducto Collahuasi [en línea]. Sitio web: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/7078/MMA-HUM2_0014_v1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consulta: 20 marzo 2019].

13. Robert Mott. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México: ReeAnne Davies, 2006. 647 páginas. ISBN: 970-26-0805-8.

14. Claudio Mataix. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2da Edición. Madrid: Castillo S.A, 1986. 345 páginas. ISBN: 84-219-0175-3.

15. Yunus A. Çengel, y John M. Cimbala. Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones. 2da Edición. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A, 2012. 1008 páginas. ISBN: 978-970-10-5612-4.

ANEXOS

ANEXO A: ACCIDENTES FERROVIARIOS.

Imagen N°1: “Accidente del ferrocarril que transporta concentrado hacia Ventanas”.

Tren con carga de cobre descarriló en Quillota y generó derrame de combustible

Fuente: Cooperativa.

Imagen N°2: “Descarrilamiento del tren con mineral”.

Fuente: Gobernación Provincial de Quillota.

Imagen N°3: “Descarrilamiento del tren y contaminación del suelo”.

Tren cargado con concentrado de cobre descarrila cerca de Río Blanco

Fuente: Diario El Observador.

Imagen N°4: “Casa dañada por descarrilamiento del ferrocarril”.

Tren con cobre se descarriló y contenedor cayó sobre el muro de una casa

Fuente: Diario El Observador.

Imagen N°5: “Descarrilamiento de 6 vagones con mineral en San Felipe”.

Fuente: Diario El Observador.

Imagen N°6: “Accidente del tren con víctimas fatales”.

Fallecidos en colisión con tren de carga en La Cruz celebraban su primer aniversario

Fuente: Diario El Observador

Imagen N°7: “Colisión del tren de carga con un camión, dejando lesionados”.

Un herido grave deja choque de tren del cobre con camión en acceso a Quillota

Fuente: Diario El Observador.

Imagen N°8: “Ferrocarril ocasionando congestión vehicular en el sector.

Tren detenido en medio del cruce San Pedro provocó gran taco vehicular

Fuente: Diario El Observador.

Imagen N°9: “Accidente de ferrocarril dejando a una persona herida”.

Joven de 19 años debió someterse a amputación tras ser atropellado por un tren en Quillota

Fuente: Diario El Observador.

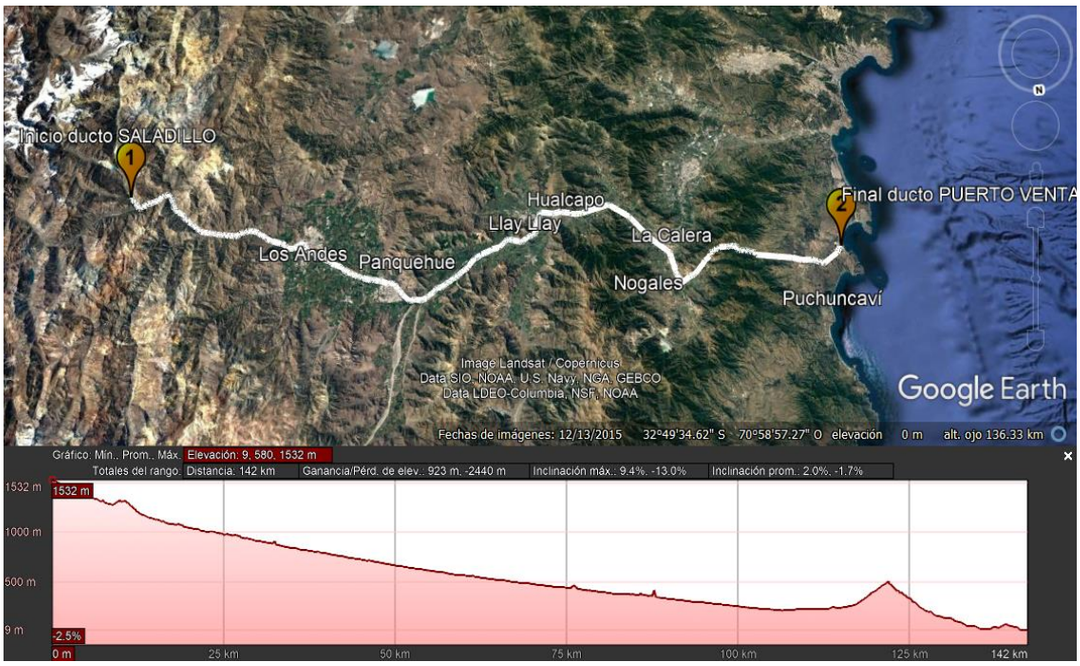
Imagen N°10: “Empresa ferroviaria es denunciada”.

Fepasa es denunciada ante la SMA por descarrilamiento de tren con concentrado de cobre

Fuente: Chile Sustentable.

ANEXO B: TRAYECTO TRAZADO PARA EL TRANSPORTE A TRAVÉS DEL DUCTO.

Imagen N°11: “Recorrido del nuevo sistema de transporte propuesto”.



Fuente: Google Maps.

Imagen N°12: “Transporte por ductos”.

Fuente: Mercadoenergia.com.