

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA



“CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE MOLIBDENO DE LAS AGUAS DE POZO PROFUNDO DEL TAJO ANTAMINA”

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADA POR : Bach. ROBERTO CÉSAR CÁRCAMO DÍAZ.

ASESORADO POR : Dr. OSCAR JUAN RODRIGUEZ TARANCO.

CALLAO – PERU

2021

Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS - CÁRCAMO DÍAZ ROBERTO CÉSAR.pdf (D114910636)
Submitted: 10/11/2021 8:34:00 PM
Submitted By: fiq.investigacion@unac.edu.pe
Significance: 1 %

Sources included in the report:

16612-Vargas Puerta, Rober Mauricio-1.pdf (D51439216)
12124-Hidalgo Rojas, Elisabeth Marleny.pdf (D40205951)
8735 aguilar_gj_.pdf (D35347146)
<https://www.antamina.com/quienes-somos/historia/>

Instances where selected sources appear:

10



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Av. Juan Pablo II N° 306 – Bellavista – Callao



N° 040–2021–UIIQ–FIQ–V.

EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO, que suscribe:

HACE CONSTAR:

Que, el señor **ROBERTO CÉSAR CÁRCAMO DÍAZ** Bachiller de la Facultad de Ingeniería Química con **Código N° 950947i**, ha presentado su Tesis titulada **“CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE MOLIBDENO DE LAS AGUAS DE POZO PROFUNDO DEL TAJO ANTAMINA”**, la cual al ser revisada con el sistema URKUND, se encontró un 1% de similitud (se adjunta informe N° D114910636); por lo que la Unidad de Investigación de Ingeniería Química, expide la presente **CONSTANCIA DE AUTENTICIDAD** a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Bellavista, octubre 11 del 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Dr. NESTOR MARCIAL ALVARADO BRAVO
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

DICTAMEN DE EXPEDIENTE PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO POR LA MODALIDAD DE TESIS SIN CICLO DE TESIS

N° 016-2021-CGT-FIQ

La Comisión de Grados y Títulos, visto y revisado el expediente N°5702-2021-08-0006265-002944 - 003096 remitido mediante Proveído N°0969-2021-FIQ-V; presentado por el Señor Bachiller CÁRCAMO DÍAZ ROBERTO CÉSAR; quién solicita el Diploma del Título Profesional de Ingeniero Químico por la modalidad de Tesis sin Ciclo de Tesis.

CONSIDERANDO:

Que, el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao vigente aprobado con Resolución N°245-2018-CU de fecha 30 de octubre de 2018 y su modificatoria aprobada por Resolución 084-2021-CU de fecha 27 de mayo de 2021, norman los requisitos de los expedientes para la obtención del Título Profesional.

Que, en el Acta N°227 del Libro de Actas de sustentación de tesis sin ciclo de tesis N°2 folio N°44 para la obtención de Título Profesional de Ingeniero Químico por la modalidad de Tesis sin ciclo de Tesis, de fecha 19 de setiembre de 2021, se contempla que el Jurado da por **APROBADO** al sustentante CÁRCAMO DÍAZ ROBERTO CÉSAR; y que en el Dictamen N°008-2021-JCCC-FIQ del Presidente de Jurado, de fecha 12 de octubre de 2021, el Presidente del Jurado da la conformidad para que continúe con los trámites respectivos.

Que, el recurrente cumple con los requisitos señalados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao

POR LO EXPUESTO:

La Comisión de Grados y Títulos acuerda: **APROBAR** el expediente presentado por el señor Bachiller CÁRCAMO DÍAZ ROBERTO CÉSAR para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Químico, en la modalidad de tesis sin ciclo de tesis.

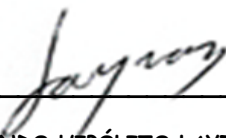
LA COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS:



Ing. CARLOS ERNESTO ANGELES QUEIROLO
Presidente de la Comisión de Grados y Títulos



Ing. CARMEN GILDA AVELINO CARHUARICRA
Miembro de la Comisión de Grados y Títulos



Lic. FERNANDO HIPÓLITO LAYZA BERMÚDEZ
Miembro de la Comisión de Grados y Títulos

Bellavista, 05 de noviembre del 2021

INDICE	PAG.
PROLOGO	3
RESUMEN	5
I. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Presentación del Problema.	6
1.2. Enunciado del Problema.	9
1.3. Objetivos de la Investigación de la Tesis.	10
1.4. Justificación de la Investigación.	10
1.5. Antecedentes vinculados a la Tesis.	11
1.6. Enunciado de la Hipótesis.	12
II. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Presencia de la Compañía Minera Antamina en el Perú.	13
2.2 Actividad Productiva de la Compañía Minera Antamina.	16
2.2.1 Proceso de extracción.	26
2.2.2 Proceso de molienda.	33
2.2.3 Proceso de Flotación.	44
2.2.4 Proceso de transporte de mineral.	65
2.2.5 Proceso de embarque de mineral.	75
2.2.6 Proceso de tratamiento de efluentes	96
2.3 Operaciones en la zona del Tajo Antamina.	109
2.4 Disposición de aguas en el Tajo Antamina.	112

2.4.1. Descripción de los principales componentes que comprenden SWMS.	114
2.4.2. Descripción del sistema de colección de agua del tajo Antamina.	116
2.4.3. Sistema de tratamiento	119
2.5 Presencia del Molibdeno en aguas de pozo profundo.	123
2.6 El Molibdeno como agente contaminante.	126
III. EQUIPOS MATERIALES Y MÉTODOS	131
3.1 Equipos.	131
3.2 Materiales.	132
3.2.1. Reactivos e insumos	132
3.2.2. Materiales de laboratorio	133
3.3 Método experimental.	133
3.4 Método para definir las condiciones de operación.	133
IV. RESULTADOS	144
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	155
VI. CONCLUSIONES	161
VII. RECOMENDACIONES	164
VIII. FUENTES DE INFORMACIÓN	165
IX. APÉNDICES	169
ANEXOS	

PROLOGO

La compañía minera Antamina, entre sus operaciones metalúrgicas que realiza, almacena minerales de ley marginales y de baja ley, que contienen cobre, zinc y molibdeno con ley de plata y plomo.

La gran cantidad de estos minerales expuestos al medio ambiente se oxidan y luego se lixivian in situ con el drenaje de las pilas por acción de la naturaleza. Debido a esta lixiviación in situ de los minerales; al extraer el agua subterránea se ha detectado que en la capa freática del tajo Pit Antamina contiene hierro, cobre, plomo, zinc y molibdeno. Para tales minerales con excepción para el molibdeno, la Compañía minera Antamina ha desarrollado una forma de tratamiento adecuado por medio de la floculación de los metales totales y la precipitación de los metales disueltos por medio de hidróxido de sodio.

Al realizar la extracción del agua subterránea previo el análisis respectivo se ha encontrado a este líquido elemento conteniendo una ley alta de molibdeno.

Como es sabido el molibdeno es un serio elemento contaminante al medio ambiente, porque la bioacumulación en las plantas, animales generan enfermedades como el molibdenosis en el ganado

Debido a este problema, con la finalidad de evitar la contaminación ambiental en la zona, y a pesar que en el Perú desafortunadamente no hay una ley que regula el contenido de molibdeno en el agua subterránea para su uso respectivo, se plantea

solucionar este problema serio determinando las condiciones de operación adecuada para la remoción del molibdeno de las aguas de pozo profundo del tajo Antamina utilizando sulfato férrico como el reactivo floculador del molibdeno, dando lugar a un entramado de sólidos de mayor volumen y peso, y de esta forma consiguiéndose un aumento considerable del tamaño y la densidad de las partículas adsorbidas, aumentando por tanto la velocidad de sedimentación de los flóculos en forma estable. El cual es materia de demostrar en la presente tesis desde el punto de vista técnico, siendo una alternativa importante para la preservación y el re-uso del agua tratada en este lugar.

Los resultados obtenidos en la presente tesis serán utilizados para realizar pruebas a gran escala y la posible construcción de una planta para reducir el contenido de molibdeno en las aguas que se envían a la quebrada Antamina.

RESUMEN

Se estudio, y se demuestra en la presente tesis las condiciones de operación para la remoción de molibdeno en las aguas de pozo profundo del tajo Antamina utilizando sulfato férrico para la sedimentación del Molibdeno, que a través de ello, el agua efluente de este pozo puede ser usado ya que se redujo el contenido de molibdeno a cantidades de 0,01mg/L de molibdeno y evitar la contaminación ambiental en beneficio del lugar y de la comunidad que rodea a la minera Antamina.

Se realizaron pruebas experimentales, utilizando equipo de jarras provisto de cuatro puntos de agitación, equipo multiparamétrico, equipo de filtración, equipo de espectrofotometría y equipo de microscopia.

Entre las mejores condiciones de operación para un eficiente proceso de remoción de molibdeno de las aguas de pozo profundo del tajo Antamina, se han encontrado que es necesario agregar sulfato férrico a la muestra de agua de pozo profundo hasta alcanzar un pH de 5.5, que es el medio idóneo para poder remover el 97,286% de molibdeno. Para un litro de agua del pozo profundo se ha encontrado las siguientes condiciones de operación: Agregar 3 ml de Sulfato férrico el cual alcanza el pH adecuado para su remoción, $\text{pH} = 5,5$; durante 1min. (tiempo de coagulación), a una velocidad de agitación de 100 RPM; luego agregar 4 ml de floculante (Magnofloc) durante 15 min. (tiempo de floculación) a una velocidad de agitación de 30 RPM para acelerar la sedimentación.

I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Presentación del Problema.

La compañía de explotación minera es una de las actividades más problemáticas en todo el mundo. La extracción minera y su proceso son fuentes de muchos contaminantes que están dispuestos en el ambiente, de ahí la contaminación del agua, el suelo, y el aire. La exposición de los minerales sulfurosos al aire, agua, procesos microbianos y oxidación producen drenaje ácido de mina, caracterizado por su alta acidez y alta cantidad de metales pesados disueltos. Cuando esta agua contaminada alcanza los cuerpos del agua, las alteraciones del ecosistema de hecho ocurrirán. La flora y la fauna pueden ser afectadas y los recursos hídricos pueden tornarse dañinos para el consumo humano o los propósitos agrícolas e industriales. También la infiltración del drenaje ácido de la mina puede contaminar suelos y el agua subterránea[17, 18].

El drenaje ácido de mina causa grandes problemas ambientales debido a su alto potencial de contaminación de los recursos hídricos superficiales o subterráneos.

La compañía minera Antamina explota el yacimiento skarn de cobre y zinc más grande del mundo, con mineralización de cobre y zinc principalmente. Además de los minerales mencionados se tiene la presencia de plata, bismuto, molibdeno, y entre otros minerales dándole cierta complejidad al yacimiento.

El yacimiento esta ubicado en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, departamento de Ancash. La operación de carguío, voladura y minado mueven aproximadamente 400 000 toneladas por día de material, de los cuales 90 000 toneladas por día llegan a la planta concentradora para la producción de concentrado de cobre, zinc y molibdeno con leyes de plata y plomo.

Como parte de la operación de mina, Antamina almacena estos materiales de ley marginal y baja al sur del tajo, en la zona conocida como “Rampa sur” que posteriormente son mezclados con minerales de alta ley para alimentar a la concentradora de manera regular y uniforme. Como producto del almacenamiento de minerales de ley marginal y baja (MLMB) por la exposición de sulfuros metálicos al medio ambiente en las mismas pilas, se produce por la naturaleza un fenómeno de oxidación de los metales expuestos y su posterior lixiviación in situ en el drenaje de las pilas[15,17,18.

Antamina al realizar estudios sobre la contaminación ambiental detecto en el efluente de las pilas, que por el problema de lixiviación in situ de estos materiales almacenados contenían hierro, cobre, zinc, plomo y entre otros minerales; para lo cual diseñó un sistema de tratamiento adecuado para el abatimiento de hierro, cobre, plomo y zinc, mediante floculación de metales totales y precipitación de metales disueltos por elevación de pH en pozas mediante adición de hidróxido de sodio.

El Tajo Pit de Antamina se encuentra sobre lo que fue una laguna, debido a esta ubicación existen afloramientos de agua subterránea provenientes de la capa freática, por lo que Antamina tiene un programa para preservar la capa freática del Tajo Pit para que de esta manera poder continuar con sus operaciones de profundización del tajo y el retiro del mineral.

El agua subterránea se extrae usando bombas que están instaladas en los puntos donde la capa freática está más cerca de las excavaciones y el agua succionada es dispuesta en la quebrada Antamina previo análisis de su calidad.

Debido al contacto del agua subterránea con el mineral, el agua extraída de los pozos profundos reportan el contenido de leyes altas en la concentración de molibdeno motivo por el cual toda el agua de los pozos profundos es derivada a la poza de almacenamiento de relaves.

El contenido de molibdeno en aguas efluentes de los centro mineros desafortunadamente no esta regulado por ninguna ley en el Perú, como es sabido el molibdeno es un contaminante de interés para la actividad minera polimetálica debido a la probada capacidad de bioacumulación en las plantas y animales, y posterior generación de enfermedades relacionadas, como es el caso de molibdenosis en ganados.

Con respecto a este problema, Antamina ha desarrollado proactivamente un estándar interno del contenido de molibdeno total disueltos en la cuenca de

Carash, afluente del río Mosna, hacia donde las descargas de las operaciones del tajo son enviadas previo tratamiento. Este estándar está basado en pruebas ecotoxicológicas con bioensayos desarrollados por expertos en Canadá. Con el propósito de cumplir el estándar interno de molibdeno total, Antamina plantea la construcción de un proceso de tratamiento de molibdeno basado en la metodología de lodos activados y co-precipitación de molibdeno con sulfato férrico en molibdato de hierro, que es bastante estable para su tratamiento posterior.

Tomando estos antecedentes, en la presente tesis se demuestra las condiciones de operación para la remoción de molibdeno de las aguas de pozo profundo del tajo Antamina realizando experimentalmente los ensayos de co-precipitación de molibdeno con sulfato férrico a nivel de laboratorio, como un estudio previo para el diseño y la construcción de la planta de tratamiento del agua de la compañía minera Antamina.

1.2. Enunciado del Problema.

¿Cuáles deben ser las condiciones de operación para la remoción de molibdeno de las aguas de pozo profundo del tajo Antamina, utilizando sulfato férrico para la sedimentación del molibdeno como flóculos de mayor volumen y peso?

1.3. Objetivos de la investigación de la tesis

Objetivo General

Establecer las condiciones de operación para la remoción de Molibdeno de las aguas de pozo profundo del Tajo Antamina.

Objetivos específicos

- a) Determinar el rango de pH adecuado para la remoción de Molibdeno.
- b) Determinar el tiempo de retención para la reacción.
- c) Determinar el tiempo de sedimentación para el proceso de tratamiento.
- d) Determinar la cantidad adecuada de floculante.

1.4. Justificación de la Investigación.

La presente propuesta se justifica por las siguientes razones:

- a) El alto contenido de Molibdeno en aguas de pozo profundo del tajo Antamina, afecta su proyección futura de empleo de agua para la agricultura y ganadería por lo cual se requiere disminuir el contenido de Molibdeno.
- b) La remoción de Molibdeno para los que se requiere tratar demandan una fuerte inversión económica, siendo su tratamiento con Sulfato Férrico una alternativa más económica.

- c) Los resultados que se logran con la presente investigación significará un aporte no solo para Antamina sino también para empresas mineras de otras regiones en las que se presenten similares situaciones.

1.5 Antecedentes Vinculados a la Tesis.

De acuerdo con Kadlec (2005), se cuenta con muy poca información disponible acerca de la remoción de molibdeno en los wetlands artificiales. Sin embargo, los dos proyectos que se describen a continuación han proporcionado información sobre la remoción de molibdeno que es relevante para el proyecto de Antamina, aunque el objetivo principal de los dos proyectos no haya sido el molibdeno[21].

Springdale, PA (Rightnour y Hoover, 1998)[20]. “Allegheny Power” y “The Electric Power Research Institute” (EPRI) llevaron a cabo una serie de estudios en un sistema wetland de ocho celdas que trataba el lixiviado de los residuales de combustión del carbón. El sistema cubría un área total de 2,230 m², con un caudal promedio de 2.5 L/s. El tiempo de retención fluctuaba entre uno y tres días. Durante los tres años que duró el estudio, las concentraciones promedio de molibdeno en el caudal de entrada fueron de 0.296 mg/L y las concentraciones promedio de molibdeno en el caudal de salida fueron de 0.183 mg/L. El sistema fue cargado hidráulicamente a 9.8 cm/d. El volumen de remoción resultante fue de 0.011 gm/m²/d.

Tulare Lake Basin, CA (Fox y Doner, 2000 & 2002). Se operaron wetlands piloto (1125 m²) a distintas profundidades y con diferentes tiempos de retención. Las concentraciones promedio de molibdeno en el caudal de entrada fueron de 1.2 mg/L y las concentraciones promedio de molibdeno en el caudal de salida fueron de 0.5 mg/L, con un tiempo de retención de 6 -19 días. La carga hidráulica fluctuó entre 0.8 - 2.5 cm/d. La reducción de la carga fue de aproximadamente 0.009 gm/m²/d. Se encontraron acumulaciones de 25 - 50 mg/kg en los sedimentos luego de tres años de operación. Se determinó que estas acumulaciones podían oxidarse si los sedimentos se secaban, por lo que fueron movilizadas como compuestos solubles de molibdeno luego de ser rehumedecidas.

1.6 Enunciado de la Hipótesis.

Las condiciones de operación deben considerar un pH adecuado entre 4 y 6.5, un volumen de consumo de Sulfato Férrico entre 2 y 10 ml. Y un tiempo de sedimentación entre 1 a 10 minutos.

II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Presencia de la compañía minera Antamina en el Perú.

La industria de explotación minera es una de las actividades económicas más importantes del Perú, por la existencia de las minas en el norte, en el centro, y en el sur del País.

En la década del 50 del siglo pasado, el yacimiento de Antamina estuvo dentro de la cartera de exploración de Cerro de Pasco Corporation, la que concluyó en un positivo estudio de factibilidad técnico - económica, pero la situación del país de esa época hizo que su explotación se pospusiera indefinidamente.

Con el gobierno militar de los años 70, la propiedad de Antamina reversionó al Estado y estuvo en manos de Minería Perú durante más de 15 años, para luego proceder a su privatización en 1996.

Los inversionistas que ganaron la licitación formaron Compañía Minera Antamina S.A. Después de un proceso de dos años de exploraciones y tres años de construcción de su complejo minero inició sus operaciones de prueba el 28 de Mayo del 2001, luego de concretarse la mayor inversión en la historia de la minería peruana.

Compañía Minera Antamina S.A. es una empresa peruana, regida por la legislación peruana con capitales extranjeros y cuyos accionistas son cuatro compañías líderes en la minería internacional:

- Xtrata con el 33,75%
- BHP Billinton Plc. Con el 33,75%
- Teck - Cominco Limited con el 22,5%
- Mitsubishi corporation con el 10%

Poco más de 5 meses después de dar inicio a sus operaciones en prueba, Antamina comenzó su producción comercial el primero de Octubre, produciendo concentrados de cobre y zinc y otros subproductos.

La ceremonia de inauguración oficial de las operaciones se realizó el 14 de Noviembre del 2001 contando con la presencia del Sr. Presidente Constitucional de la República, Dr. Alejandro Toledo, así como de diversas autoridades y representantes de la compañía Minera Antamina.

Compañía Minera Antamina S.A- es la mayor inversión realizada en la historia de la minería peruana (aproximadamente 2 260 millones de dólares). Poco tiempo después de iniciadas sus operaciones, Antamina se ha constituido en uno de los mayores productores nacionales de concentrados de cobre y zinc del país.

Compañía Minera Antamina S.A. tiene una amplia zona de influencia, Antamina tiene dos principales zonas de operaciones:

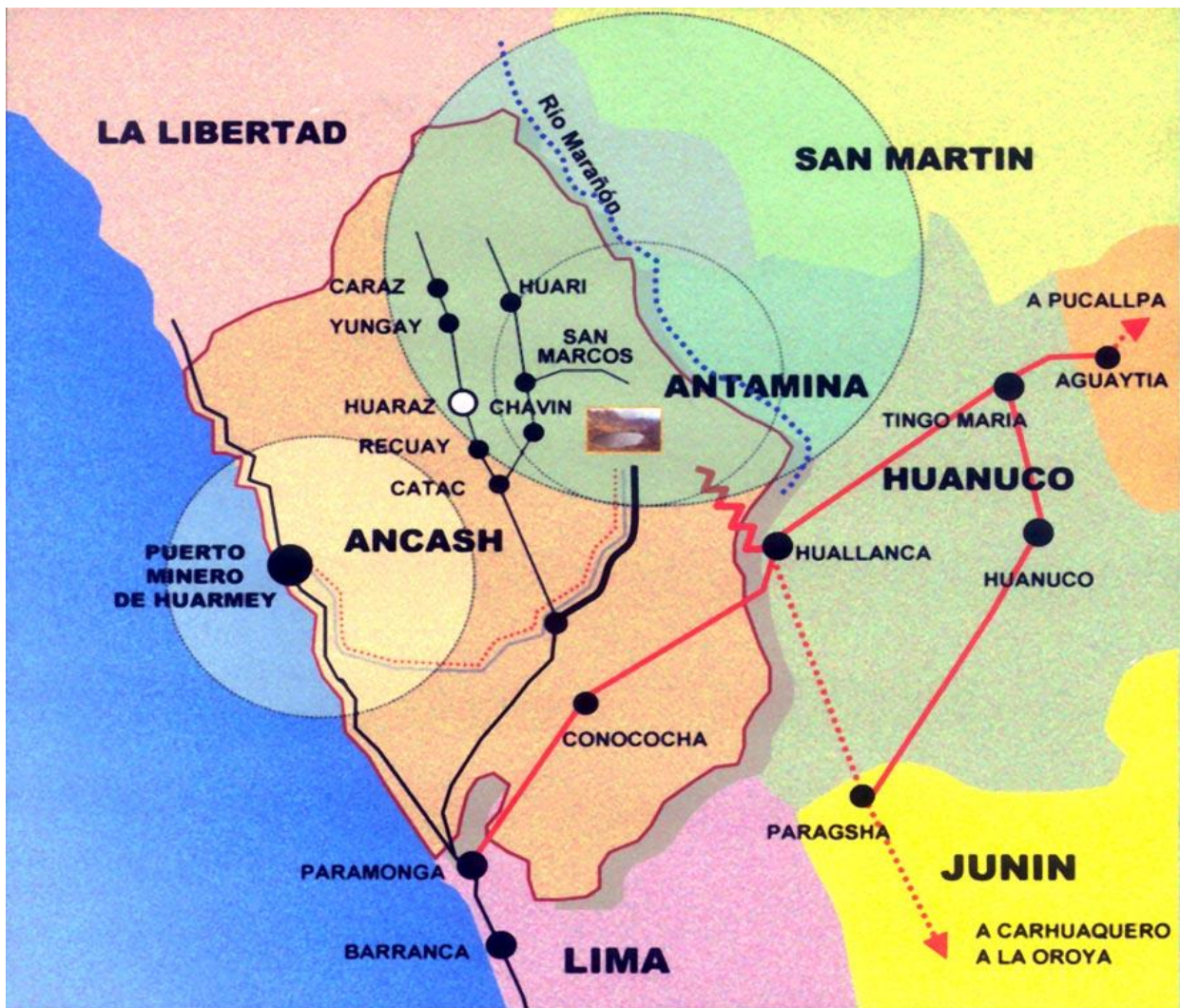
- Mina

Ubicada en el departamento de Ancash a 270 Kilómetros al noreste de Lima, en la quebrada Antamina, en el distrito de San Marcos, Huari, Ancash.

- Puerto

Ubicada en el departamento de Ancash Puerto punta Lobitos en la costa de Huarney.

Figura N° 2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS INSTALACIONES DE LA COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Las operaciones entre mina y puerto están conectadas gracias a un mineroducto (tubería subterránea) que transporta los concentrados que produce la compañía y que recorre 320 Kilómetros cruzando el departamento de Ancash.

Antamina esta ubicada, a más de 4300 metros sobre el nivel del mar, y produce diferentes concentrados de mineral, fundamentalmente de cobre y zinc. Asimismo tratan polvos finos de mineral que han sido reducidos a micrones y que son llevados a fundiciones en el extranjero. El yacimiento Antamina cuenta también con otros minerales explotados como el molibdeno, la plata, el plomo y el bismuto que son obtenidos de manera secundaria en el proceso de producción.

Por otro lado, Antamina cuenta con una planta concentradora que hoy en día es considerada como la más grande en tratamiento de minerales polimetálicos a nivel mundial.

2.2 Actividad Productiva de la compañía minera Antamina.

Como en toda actividad minera, Antamina extrae sus recursos minerales de la tierra. Estos son procesados en la mina y luego transportados por una tubería subterránea, denominada mineroducto, para luego ser embarcados al puerto de Huarmey.

Los minerales explotados que se encuentran en el yacimiento Antamina y que se pretende extraer no estaban visibles en un primer momento. Puesto que, uno de los grandes desafíos para dar marcha a una operación minera como esta, lo

constituyo el hecho que hubo que remover parte de las montañas y desaguar una laguna para dejar al descubierto el material mineralizado. Después de cuatro años hoy se abre paso un gran tajo abierto.

Se tuvo que remover primero 110 millones de toneladas de material estéril, roca sin contenido mineral, de la cual una pequeña cantidad fue utilizada en la construcción de la presa de relaves de la operación.

El yacimiento explotado por Antamina es del tipo Skarn con mineralización de Cobre, Zinc, Plata y Molibdeno principalmente, esto hace que el procesamiento de los minerales sea complejo en las áreas de operación, especialmente en la flotación.

Las actividades productivas de la compañía minera Antamina incluyen varias etapas de procesos metalúrgicos, que se inician en la mina con la extracción del mineral, este mineral es acarreado hacia la chancadora giratoria en camiones CAT 793 de 240 toneladas de capacidad, que alimentan a la chancadora primaria, este mineral ingresa a la chancadora con un tamaño no mayor a 1,5 metros y sale con un tamaño de menos 6 pulgadas luego es transportado por fajas de 2,7 kilómetros de longitud que a su vez alimentan al apilador radial que se mueve sobre una plataforma rodante, la cual descarga hacia 2 stock piles de 50 000 toneladas de capacidad viva.

Figura N° 2.2 APILADOR RADIAL.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Debajo de las pilas de almacenamiento de mineral se encuentran 6 alimentadores de placas, los que se encargan de extraer el mineral y alimentar a la faja que transporta el material hacia el molino SAG, cuyo producto se distribuye hacia 3 cajones de bombas, que envían la pulpa hacia los nidos de ciclones, estos están conformados por 14 hidrociclones los cuales clasifican los gruesos hacia 3 molinos

de bolas. Estos molinos trabajan en circuito inverso con los nidos de hidrociclones, se llama inverso porque la pulpa es alimentada al hidrociclon y no al molino.

El proceso de flotación empieza en el cajón distribuidor que recibe los tres over flow o finos de los nidos de ciclones, este distribuye la carga en las 3 líneas del circuito de cobre, estas líneas se conocen como flotación Rougher.

El concentrado de primera limpieza, ya es el concentrado final cuya ley se estima en un promedio de 30% de cobre; la cola o relave de la primera limpieza va a la flotación Scavenger o desbaste la que se encarga de enviar el concentrado a la segunda limpieza, cuyo concentrado se une con el de la primera limpieza, llegando a formar el producto final de concentrado Bulk o de Cobre, el cual va al espesador de Bulk o Cobre dependiendo de la calidad del mineral tratado y el concentrado obtenido.

Figura N° 2.3 CELDAS DE FLOTACIÓN DE COBRE.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

De manera similar que en la flotación de Cobre se tiene el mismo arreglo de las celdas en la flotación de Zinc.

El concentrado Raugher se envía a una clasificación donde los gruesos alimentan a dos molinos verticales los que trabajan en circuito cerrado con el nido de ciclones, y las colas de esta etapa conforman el relave final junto con las colas Scavenger .

Los finos de los hidrociclones pasa a la primera limpieza, el concentrado de esta etapa es el concentrado final de Zinc, el que debe tener una ley promedio de 54% de Zinc.

La cola o relave de la primera limpieza va a flotación de Scavenger o desbaste, cuyo concentrado va a la segunda limpieza, cuyo concentrado se une con el concentrado de la primera limpieza, las que forman el concentrado final de Zinc.

El concentrado de Zinc es enviado al espesador de Zinc.

Figura N° 2.4 CELDAS DE FLOTACIÓN DE ZINC.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

En el espesador Bulk se sube el porcentaje de sólidos por medio de la sedimentación natural, y con la ayuda de reactivos llamados floculantes, las que aglomeran partículas pequeñas y las convierte en grandes haciéndolas sedimentar rápidamente.

Cuando se obtiene una pulpa de 60% de sólido, se bombea a los tanques de almacenamiento de concentrado Bulk con molibdeno o Bismuto, dependiendo del mineral que se está tratando en la planta.

Luego de estos tanques el concentrado Bulk es bombeado hacia la flotación conocida como Rougher de Bismuto o Molibdeno, el relave de esta etapa es el concentrado final de Cobre, el cual es direccionado al espesador de Cobre.

El concentrado Rougher de bismuto o Molibdeno pasa por tres etapas de limpieza, de donde se envía hacia los espesadores de Bismuto o Molibdeno, dependiendo de los que se este flotando.

Figura N° 2.5 CELDAS DE FLOTACIÓN DE BISMUTO.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

La operación del mineroducto comienza en los espesadores: Bulk, Cobre y Zinc.

La característica principal de la pulpa que se debe almacenar es que debe tener 60% de sólidos, tanto para el concentrado de Cobre y el de Zinc.

El almacenamiento del concentrado de Cobre se realiza en tres tanques y el de Zinc en 2 dos tanques. Luego el concentrado almacenado se envía hacia las bombas Wirth de tipo pistones, las que se encargan de trasladar la carga hasta el punto más alto que es Yanashalla, posterior a este punto la pulpa se desplaza por gravedad

hasta el puerto totalizando los 306 kilómetros de longitud que tiene el mineroducto. Cabe destacar que el bombeo se hace por batches o lotes, además los envíos de concentrados son separados por medio de agua.

Figura N° 2.6 TANQUES ESPESADORES DE CONCENTRADO DE COBRE Y ZINC.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

En el puerto la llegada del concentrado es monitoreada también por el sistema SCADA la misma del mineroducto, la cual indica el tiempo de aproximación del concentrado al puerto además el puerto cuenta con un densímetro en línea el que va tomando los sólidos de la estela avisando que el concentrado está llegando al

puerto. El concentrado que llega al puerto es almacenado en tanques según el mineral que contiene, para luego ser filtrado y transportado por medio de fajas al Almacén de concentrados. Posteriormente este concentrado será transportado por medio de fajas y medios móviles hacia los buques que se llevaran el concentrado a diversos destinos de acuerdo con nuestros contratos de ventas.

Figura N° 2.7 VISTA DEL PUERTO DE EMBARQUE.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

El agua producto del filtrado será tratada y destinada para irrigaciones de las plantaciones que Antamina tiene dentro del puerto.

La Compañía minera Antamina S.A. produce concentrados de minerales en la modalidad de tajo abierto (open pit), y para su extracción y comercialización cuenta con las siguientes unidades procesos:

- Proceso de extracción.
- Proceso de molienda.
- Proceso de flotación
- Proceso de transporte de mineral.
- Proceso de embarque de mineral.
- Proceso de tratamiento de efluentes.

2.2.1 Proceso de extracción.-

Una mina es un depósito o yacimiento que tiene minerales económicamente explotables, metales como el cobre, zinc, plata, oro, etc. Estos metales se pueden encontrar en la mina en forma de vetas o diseminados. Antamina es un yacimiento polimetálico que contiene principalmente minerales de cobre-zinc.

El sistema de minado de Antamina es a tajo abierto, por lo que los riesgos de exposición a caídas de rocas son menores respecto a labores subterráneas.

Figura N° 2.8 VISTA DEL TAJO ANTAMINA.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Antes de iniciar el minado el área de geología clasifica y limita los polígonos de minerales o desmonte, marcándolos con banderines de diferentes colores pre-determinados, luego se realizan reuniones a cargo de la superintendencia de mina para evaluar y priorizar los trabajos de carguío según la necesidad de producción, actualmente la relación de desmonte total a mineral es de 2.70.

Cabe resaltar que el plan de minado incluye perforación, voladura y acarreo de mineral y/o desmonte.

2.2.1.1 Perforación y voladura.

En la Mina se elabora los planes de perforación y voladura semanalmente, para ello diseña mallas de perforación y se da instrucciones de carguío de explosivos para los taladros perforados y diseño de amarres de voladura.

La operación de perforación se realiza con perforadoras 49R, los cuales perforan taladros de hasta 18.5 metros considerando que la altura de los bancos es de 15 metros, el diámetro de broca de perforación es de 12 ¼ pulgadas.

Estas perforadoras llevan una columna de perforación compuesta por dos barras de 30 pies de longitud y 10 ¾ pulgadas de diámetro, además de un estabilizador en la parte inferior y un adaptador de amortiguador al cabezal de rotación.

Dependiendo del grado de dureza de la roca se obtendrá una velocidad de penetración que normalmente puede variar entre 100 y 25 m/hr.

También se tiene perforadoras DMM2, que perforan taladros de 18.5 metros y con brocas de 9 7/8 pulgadas de diámetro.

Las barras en este caso son de 32 y 35 pies de longitud y 7 5/8 pulgadas de diámetro, además llevan un estabilizador en la parte inferior y un adaptador al cabezal de rotación. La velocidad de penetración que se logra es de 14 a 40 m/hr.

Concluida la perforación se procede a colocar el explosivo.

El proceso de voladura se inicia con la verificación de la profundidad de los taladros, si estos están con la profundidad de diseño, se cercara el área a cargarse con explosivo y colocarse los letreros de seguridad respectivos.

El tipo de explosivo que se usara se decide según la presencia de agua en los taladros:

- Si el taladro es seco se utilizara una carga de fondo de anfo ligero de 2.5 metros y una carga de columna de 7.5 metros con anfo.
- Si la presencia de agua es circundante y no se puede cercar el taladro mediante el uso de bombeo se utilizara anfo pesado en la columna.

Así mismo se utilizaran los accesorios necesarios para la iniciación del explosivo, los que consisten en una línea de nonel que lleva una película de aluminio en su interior y en uno de los extremos lleva un explosivo que se coloca en el fondo del taladro, este ultimo será el que explosionando produzca la detonación de la columna de explosivo.

Una vez cargado con explosivos los taladros se unirán, en el día del disparo, mediante un cordón detonante de acuerdo a un diseño previamente establecido y entre los taladros se colocaran retardadores de tiempo que normalmente van entre los 25 y 100 milisegundos con la finalidad de dar un orden de detonación de los taladros y evitar daños por vibración.

Muy próximo a la hora de voladura se procederá a extender una línea de nonel conectada a la malla con una longitud suficiente hacia un lugar seguro para iniciar la detonación, la misma que se inicia con un instrumento detonador que se acciona por golpe fulminante normal.

2.2.1.2 Carguío.

El carguío se efectúa con maquinaria pesada de alto tonelaje y de fabricación de última generación; se cuenta con una flota capaz de poder mantener y cumplir con la producción necesaria.

Figura N° 2.9 VISTA DE LA PALA BUCYRUS.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Para el carguío se emplean palas eléctricas de última generación marca Bucyrus modelo 495II, cuya capacidad de cuchareo es de 80 toneladas de material y cargadores frontales CAT modelo 994D de 35 toneladas de capacidad.

El despachante en la zona de carguío según la programación y necesidades de producción controla los tiempos, desplazamientos, paradas, tonelaje por equipo o acumulado, etc.

Figura N° 2.10 **PALA BUCYRUS CARGANDO A UN CAMIÓN CAT 793**



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

2.2.1.3 Acarreo.

Para el acarreo se emplea los camiones CAT 793-C y CAT 793-A que tienen una capacidad de carga de 240 toneladas.

Figura N° 2.11 CAMIÓN CAT 793-C DE 240 TONELADAS.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

El despachante se encarga de distribuir la flota de camiones dentro de todo el ámbito de la mina.

El acarreo se realiza desde los puntos de carguío hasta la chancadora primaria o stock piles en el caso de mineral, a los botaderos o al tailing dam como desmonte de material.

2.2.2 Proceso de Molienda:

Se entiende por molienda de minerales, a una operación unitaria de procesos metalúrgicos, cuyo objetivo es recibir una carga determinada de mineral (en seco, en cuyo caso se llamaría “autógena”, o como pulpa) ya sea proveniente directamente de la etapa de voladura en Mina o bien de un previo chancando (primario, secundario, terciario o ultrafino), y reducir lo más fino posible el tamaño de las partículas de esta carga (ya sea con medios moledores de acero, cerámica o con el propio mineral) para llevarlas a una posterior.

El proceso de molienda en la compañía minera Antamina se inicia con la extracción del mineral de las pilas de acopio, estas pilas proporcionan el material necesario que será alimentado al molino SAG para iniciar así el proceso de molienda.

En el área de acopio de minerales se encuentran dos pilas para hacer stock de mineral, cada pila cuenta con una capacidad de 260 000 toneladas métricas de las cuales 50 000 toneladas métricas son de capacidad viva. La capacidad viva es el tonelaje que se puede extraer de la pila sin la necesidad de utilizar otros equipos para empujar la carga.

Debajo de cada pila de acopio de mineral se encuentran 3 alimentadores de placas con motores de velocidad variable que pueden extraer el mineral para alimentar la faja transportadora que asu vez alimentara al molino SAG, una consideración

importante es que el molino SAG por ningún motivo el molino debe estar sin alimentación de carga.

Figura N° 2.12 ALIMENTADOR DE PLACAS.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

La faja de alimentación al molino SAG se encuentra equipada con un sensor de velocidad y con una balanza que tiene un rango de capacidad de 0 a 6000 toneladas por hora, con la información de estos instrumentos nos indica el peso que se alimenta al molino SAG por hora.

Figura N° 2.13 VISTA DE LA FAJA DE ALIMENTACIÓN AL MOLINO SAG.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora

2.2.2.1 Molinos

Los molinos convencionales son básicamente cilindros o cascos de acero al manganeso, en cuyo interior se colocan revestimientos de acero con aleaciones especiales como cromo-niquel a fin de soportar el fuerte impacto que generan los medios moledores y el mineral mismo, durante la rotación necesaria para que ambos entren en contacto.

2.2.2.2 Tipos de Molinos

Para el área de la minería existen diversos tipos de molinos que nos ayudaran a la reducción de tamaño de las rocas para poder liberar el material valioso (mena) del material que no tiene valor (ganga), existen por ejemplo molinos de bolas, molinos de barras, molinos verticales, molinos autógenos y semi-autógenos.

- **Molino semi-autógeno.**

En la práctica son muy pocos los tipos de mineral que califican para una molienda puramente autógena; a fin de optimizar la fragmentación de los minerales de dureza media a alta se requiere siempre la ayuda de medios moledores, ya sean estos bolas de acero o conos de cerámica especial.

El término “molino SAG” es el acrónimo de molino de molienda semi-autógena, el término de molienda semi-autógena significa que toda la acción de molienda es realizada por partículas de mineral que son frotadas entre si y por la acción de la bolas.

En los molinos semi-autógenos, una parte de la molienda es autógena mientras que la otra es realizada por bolas de molienda; de ahí el término semi-autógena.

- **Molinos de bolas:**

Estos molinos se utilizan para reducir el tamaño a fin de obtener un producto debajo de 100 micrones.

Estos molinos emplean bolas de diversos diámetros como medio moedor, siendo las de mayor dimensión para partículas gruesas y las de menor dimensión para las finas.

Los molinos de bolas operan en húmedo y sus mayores ventajas son su simplicidad de diseño y facilidad de acceso para su inspección como para el cambio de carcazas.

Antamina para reducir el tamaño del mineral que ingresa a la planta utiliza primero un circuito cerrado para el molino SAG y un circuito de molienda cerrado e inverso para el circuito de molienda de bolas y se caracteriza por tener:

- 01 Molino semi-autógeno o molino SAG.
- 03 Molinos de bolas.

Molino SAG:

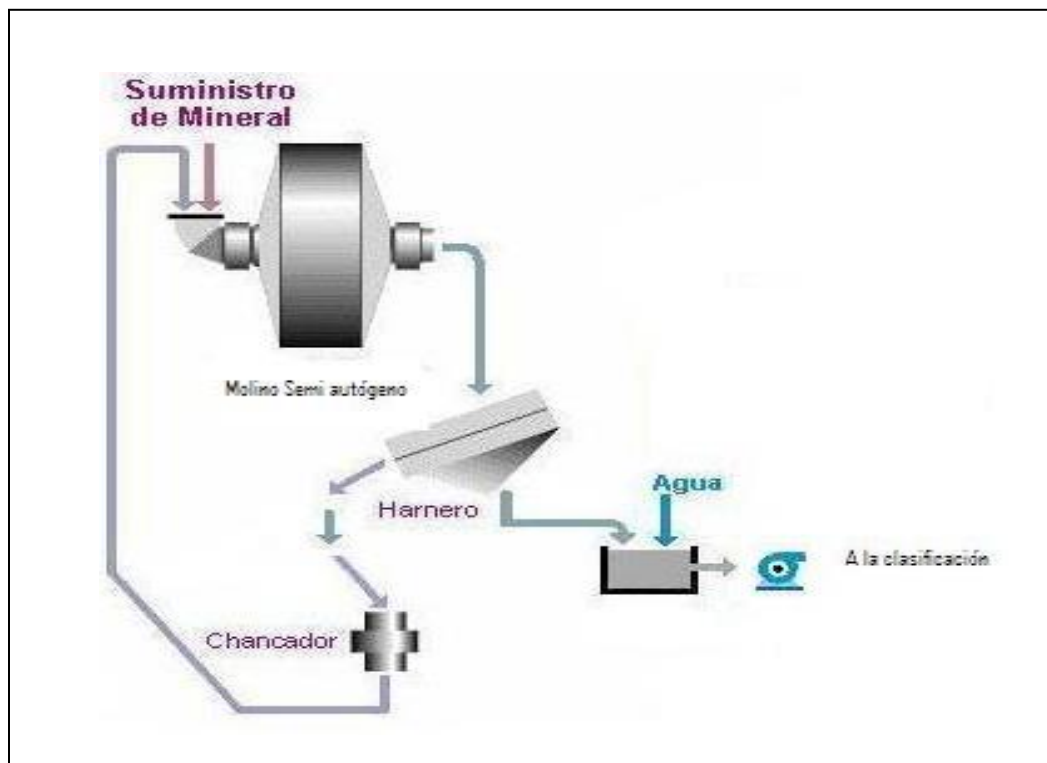
El molino SAG tiene 38 pies de diámetro y 19 pies de largo, la potencia del motor es de 27 000 HP de potencia, el molino SAG, se usa con un trómel integral equipado, que es como una malla giratoria y un cañón de retorno que cierra el circuito.

El molino SAG no tiene engranajes, utiliza un sistema GEAR LESS y es accionado por un motor con disipador térmico, enfriado con ventilador, de velocidad y frecuencias variables, es decir tiene un motor de anillo.

El rotor de este motor esta unido al molino, y el estator esta construido en un circulo alrededor del molino. La velocidad del molino SAG puede variar, esto regula la acción de caída del mineral dentro del molino y proporciona medios para controlar el régimen de molienda.

Al mineral que ingresa al molino SAG se le adiciona agua para formar una pulpa en el interior del molino, después que la pulpa de mineral es descargadas por las aberturas del trómel cae a una canaleta que la direcciona al cajón de distribución que tiene 02 vertederos regulables y uno fijo, los vertederos regulables alimentan a los cajones de alimentación de los molinos 1 y 3 y el vertedero fijo alimenta al cajón de alimentación del molino2.

Figura N° 2.14 CIRCUITO DEL MOLINO SAG.



Fuente: Elaboración propia.

Los cajones de alimentación a los molinos están equipados con una bomba de 30 por 28 pulgadas con un motor de 1 500 HP, esta bomba alimenta a un nido de 14 hidro-ciclones, a los cajones de alimentación se les agrega agua para que mantengan un nivel constante y según el requerimiento de densidad de los hidro-ciclones. El material que es rechazado por el trómel porque tiene un tamaño mayor a las aberturas es llevado por medio de canchales a una zaranda intermedia, el fino ingresa al cajón de alimentación del molino de bolas 03 y el grueso es llevado a una chancadora rotatoria que descarga a la faja de alimentación del molino SAG cerrándose de esta forma el circuito de alimentación al molino SAG..

Figura N° 2.15 MOLINO SAG.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Molinos de bolas:

Los molinos de bolas tienen 24 pies de diámetro y 36 pies de largo con un motor de 15 000 HP de potencia, estos molinos cuentan también con motores de velocidad variable.

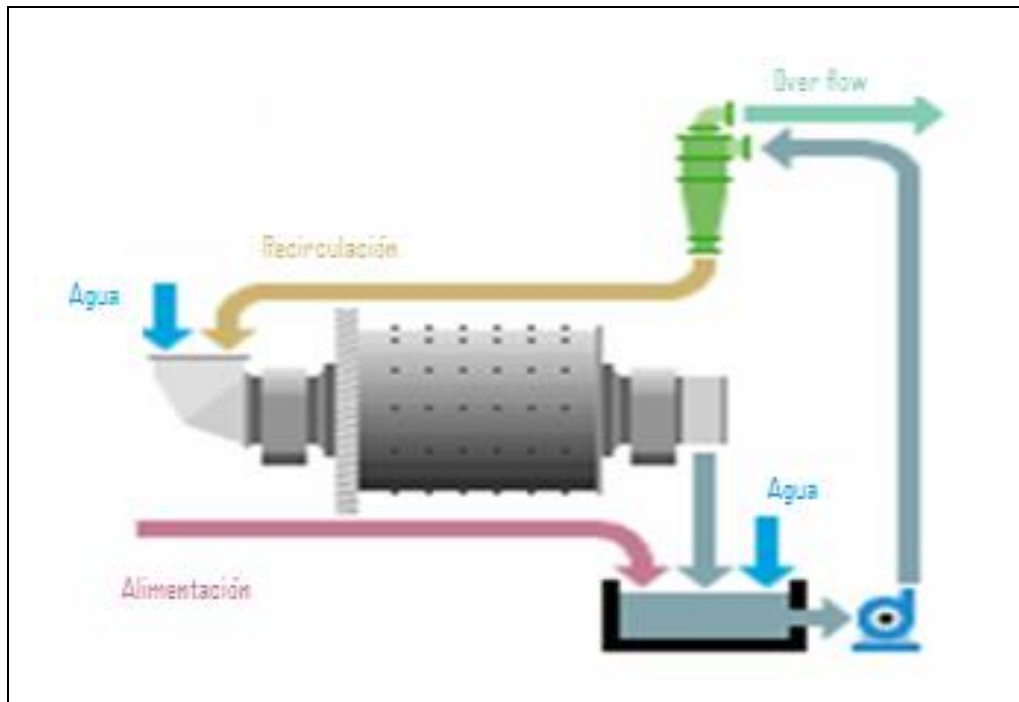
Figura N° 2.16 MOLINOS DE BOLAS.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

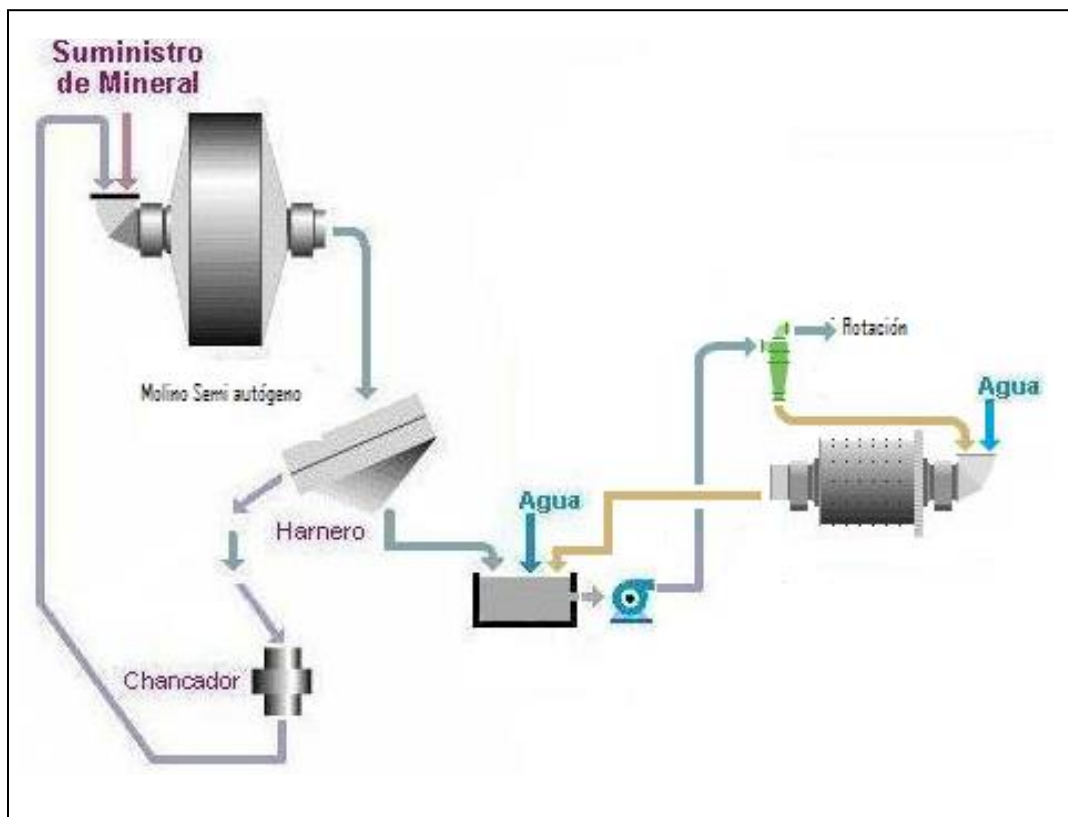
Los molinos de bolas reciben el grueso de la descarga del under flow de la batería de ciclones y descarga por gravedad a sus respectivos cajones de alimentación que es bombeado a los ciclones nuevamente, cerrando de esta manera su circuito.

Figura N° 2.17 CIRCUITO DE LOS MOLINOS DE BOLAS.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°2.18 CIRCUITO DE MOLIENDA.



Fuente: Elaboración propia.

Clasificación.- El objetivo de la clasificación es separar el producto fino del grueso, esta operación se realiza en los nidos de hidro-ciclones, que reciben la carga de los cajones de alimentación a los molinos de bolas.

En el circuito de Antamina, se usan hidro-ciclones para la clasificación de tamaños, el uso de hidro-ciclones es un método de separación por gravedad que no es costoso, el hidrociclón es un dispositivo que separa el producto mezclado del

Figura N° 2.19 NIDO DE HIDROCICLONES.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

mezclado del molino SAG y el del molino de bolas en dos partes: el fino va por la parte superior y la parte gruesa va por la parte inferior del hidro-ciclón.

La parte fina de los hidro-ciclones (over flow) pasan a flotación por una línea que tiene un sistema de muestreo, y la parte gruesa (under flow) ingresa al molino de bolas para continuar su molienda.

Los nidos de 14 hidro-ciclones trabajan en forma automática regulando la presión que se necesita para obtener una buena clasificación, los finos pasan a un analizador de tamaño de partículas en línea que proporcionan datos sobre el tamaño de partículas y porcentaje de sólidos de la pulpa.

2.2.3 Proceso de flotación.-

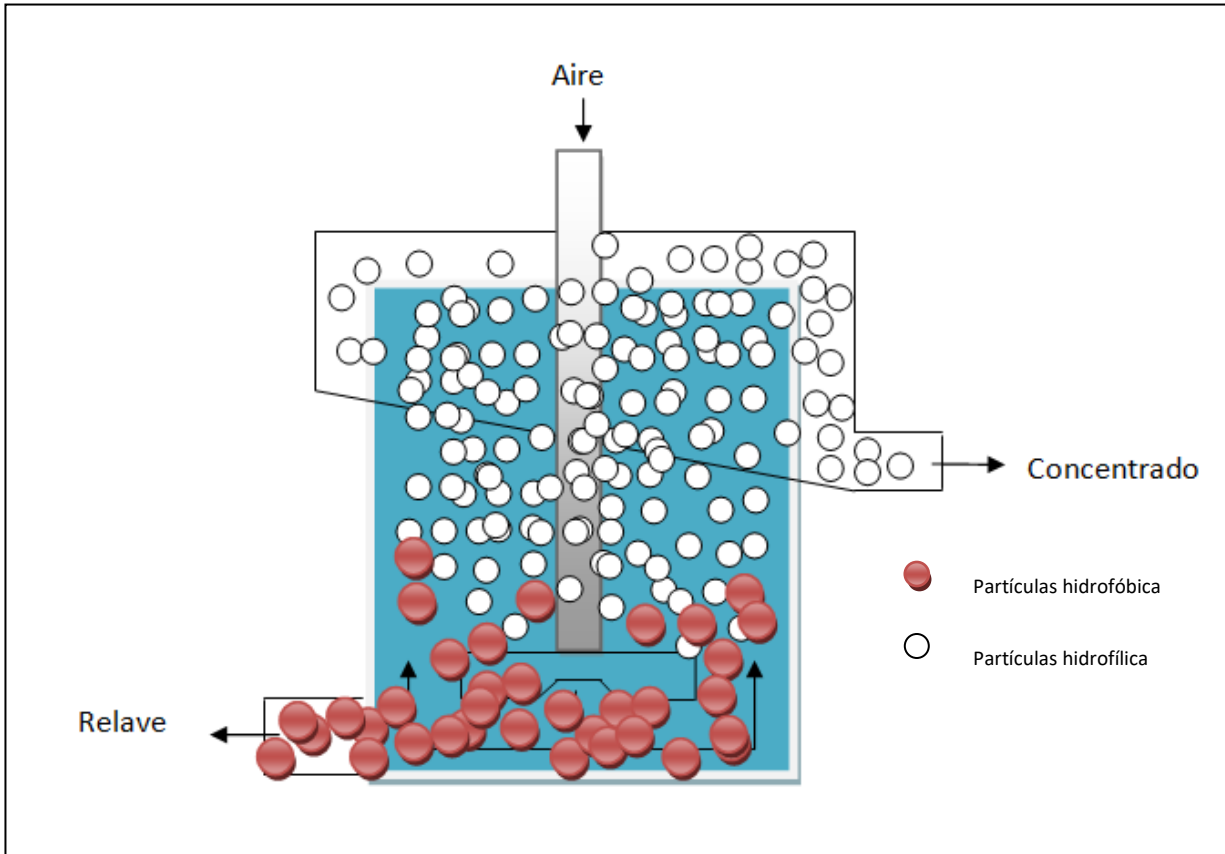
La flotación es un proceso de separación de materias de distinto origen basados en su comportamiento frente al agua, es decir, de mojabilidad de los materiales.

En nuestro caso los materiales están referidos a los minerales de Cobre y Zinc y de sus acompañantes, minerales estériles o ganga que no tiene valor comercial. Los minerales de Cobre y Zinc son pocos mojables por el agua y se llaman hidrofóbicos y la ganga (generalmente óxidos, silicatos, carbonatos, etc.) son hidrofílicos, es decir, mojables por el agua.

Los minerales hidrofílicos e hidrofóbicos de una pulpa acuosa se pueden separar entre sí, después de ser finamente molidos y acondicionados con los reactivos que hacen más pronunciadas las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas, haciendo pasar burbujas de aire a través de la pulpa.

Las partículas hidrofóbicas se van a pegar a las burbujas de aire y pasar a la espuma, mientras que las partículas hidrofílicas se van a mojar y caer al fondo del equipo de flotación.

Figura N° 2.20 EQUIPO DE FLOTACIÓN.



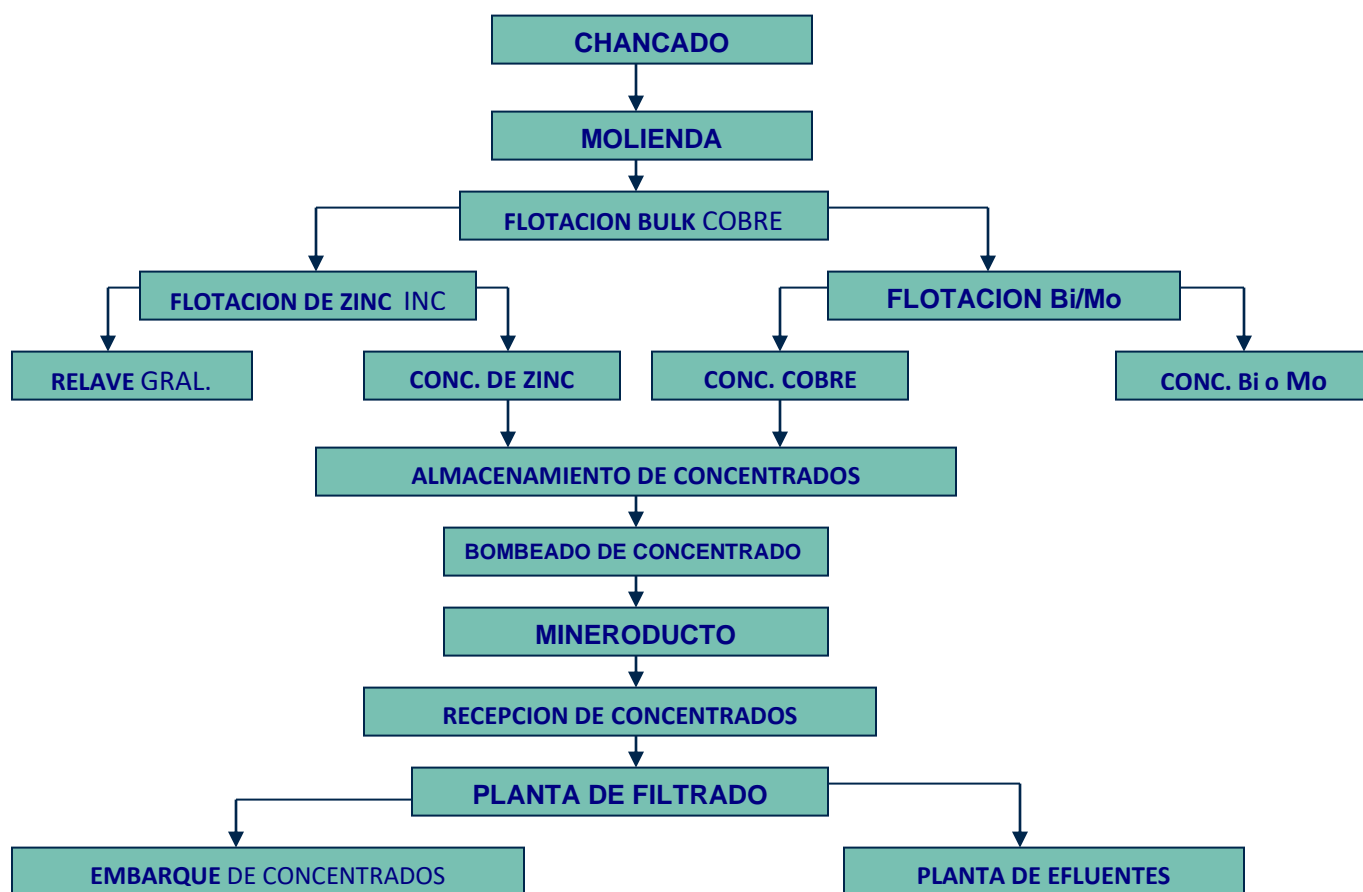
Fuente: elaboración propia

2.2.3.1 Flotación de Menas.-

Antes de ingresar al Circuito de Flotación, el mineral ha sido molido con el objetivo de llegar a partículas pequeñas (entre 100 y 150 micrones, es decir 0.1 ó 0.15 milímetros) para poder recuperar el cobre, zinc o molibdeno que se encontraban en su estructura. Este mineral se encuentra en forma de Pulpa, es decir una mezcla del mineral con agua.

La mena de Antamina es tratada en un esquema de flotación en secuencia, sometiendo primero a un proceso de flotación de cobre y luego a un proceso de flotación de zinc.

Figura N° 2. 21 **DIAGRAMA DE PROCESOS DE ANTAMINA.**



Fuente: Elaboración propia

2.2.3.2 Flotación del Cobre y Zinc.-

Como se mencionó anteriormente a fin de aumentar las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de las especies mineralógicas es necesario añadir reactivos a la pulpa (Anexo 1). Estos reactivos según su acción se clasifican en:

Colectores.- Cuya función principal es la de proporcionar propiedades hidrofóbicas a las superficies de los minerales

Modificadores.- Que sirven para la regulación de las condiciones de funcionamiento de los colectores y aumentan su selectividad y a su vez se clasifican en:

- Modificadores de PH; que controlan la concentración iónica de las pulpas y sus reacciones a través de su acidez o alcalinidad
- Activadores, que fomentan las propiedades hidrofóbicas de los minerales y aumentan su flotabilidad
- Depresores, que hidrofilizan las superficies minerales y contribuyen a su depresión.
- Espumantes, que permiten la formación de una espuma estable, de tamaño de burbujas apropiado para llevar los minerales al concentrado

2.2.3.3 Circuito de flotación de Cobre.-

El circuito de flotación consta de las siguientes etapas:

- 1.- Flotación Rougher.
- 2.- Remolienda de Concentrado.
- 3.- Flotación Cleaner y Flotación Scavenger.

La primera etapa “Flotación Rougher” o Flotación Primaria consiste en recuperar el cobre contenido en el mineral utilizando celdas de flotación convencionales. En la concentradora de Antamina se cuenta con tres filas de celdas de flotación convencional de cuatro bancos cada uno dispuestos de la siguiente manera: una con una caja de alimentación y una celda convencional y tres con una caja de alimentación y dos celdas de flotación cada una.

Figura N° 2.22 VISTA DE LAS CELDAS ROUGHER DE FLOTACIÓN COBRE.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

La segunda etapa “Remolienda” consiste precisamente en remoler el concentrado rougher de cobre. De la flotación rougher se obtienen como productos al concentrado de rougher de cobre y el relave, este último pasará al circuito de flotación de zinc si el contenido de zinc en el relave lo permite. El concentrado rougher de cobre contiene partículas de cobre de entre 50 a 150 micrones de tamaño; es necesario reducir ese tamaño hasta menos de 45 micrones con el fin de mejorar la recuperación de cobre

El Molino Vertical tiene por objetivo moler el mineral grueso hasta llevarlo a un tamaño de menos de 45 micrones. El concentrado remolido caerá dentro del mismo tanque que recepciona al concentrado rougher para ser bombeado a los ciclones, cerrando de esta manera el circuito de remolienda.

Figura N° 2.23 VISTA DE LAS CELDAS DE FLOTACIÓN SCAVENGER DE COBRE.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

El concentrado rougher pasa a un tanque desde el cual es bombeado hacia un sistema de clasificación por el método de ciclones, de esta clasificación el

concentrado que ya tiene menos de 45 micrones de tamaño caerá dentro de un tanque para luego ser enviado a las Celdas Columnares de Primera Limpieza; por otro lado, los gruesos caerán dentro del tanque de alimentación al Molino Vertical.

El objetivo de la tercera etapa “Cleaner y Flotación Scavenger” es purificar y enriquecer el concentrado aún más, para lograr este objetivo, el concentrado rougher clasificado por el nido de ciclones (menores de 45 micrones de diámetro) ingresa a un tanque desde donde es bombeado hacia cuatro celdas columnares de primera limpieza (1er Cleaner), el concentrado que flota pasa como concentrado final al Espesador Bulk, el relave pasa a las celdas scavenger; al terminar su paso a través de las celdas scavenger, el concentrado scavenger resultante caera en un tanque y será bombeado a las celdas columnares del segundo cleaner. Luego de su paso por las celdas columnares de segundo cleaner, el concentrado de cobre flotará y será transportado hacia el Espesador Bulk. Los relaves de las celdas columnares de segunda limpieza retornarán al tanque de alimentación de los molinos verticales para pasar nuevamente por el circuito explicado.

2.2.3.4 Circuito de flotación de Zinc.-

El circuito de flotación de zinc es similar al esquema del circuito de cobre con la excepción que cada fila de flotación rougher cuenta con una celda más (acondicionador) y cada etapa de limpieza cuenta con una columna de flotación adicional

2.2.3.5 Circuito de flotación de Molibdeno.-

El circuito de flotación de molibdeno está diseñado para tratar concentrado bulk y retirar gran parte de los minerales de molibdeno de la pulpa, esto se produce cuando el concentrado tiene una alta concentración de minerales de molibdeno, y el contenido de Bi es aceptable.

Por lo general, cuando el concentrado bulk proviene de un tipo de mena bornita o un tipo de mena cobre sólo bajo bismuto, el circuito se opera para recuperación de molibdeno.

Una vez retirado el molibdeno del circuito de flotación, la pulpa de desechos (concentrado de Cu) se descarga en el espesador de cobre.

El objetivo de la flotación de Molibdeno es maximizar la recuperación de minerales de molibdeno del concentrado bulk por medio de la flotación, estos productos son espesados, filtrados, secados y ensacados en bolsas para su despacho.

El circuito de flotación de molibdeno se divide en las siguientes etapas :

- Espesamiento y Almacenamiento de Concentrado Bulk.
- Flotación Rougher
- Remolienda de Concentrados
- Flotación Cleaner
- Muestreo y Análisis en Línea
- Sistema de suministro de aire de flotación
- Sistema de alimentación de Reactivos
- Espesamiento, Filtración, Secado y Descarga de Concentrado.

a) ESPESAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE CONCENTRADO BULK

La pulpa sedimentada del espesador bulk es descargada a los tanques de almacenamiento de alto y/o bajo bismuto, para la recuperación del molibdeno se descarga en el tanque de bajo bismuto, equipado con un sistema de agitación.

El concentrado bulk se bombea desde el tanque mediante bombas de alimentación de separación de molibdeno; descargan a través de unos muestreadores en línea hacia el tanque acondicionador rougher.

b) FLOTACIÓN ROUGHER

El objetivo de la flotación rougher del molibdeno es maximizar la recuperación de minerales de molibdeno a partir del concentrado bulk, y al mismo tiempo producir

un relave (que es el flujo final de concentrado de cobre) que contenga muy poco molibdeno.

superior cuenta con un colector de acumulación de gases, se dirige hacia un ducto común que alimenta al depurador húmedo de molibdeno.

Figura N° 2.24 **FLOTACIÓN DE MOLIBDENO.**



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Se cuenta con una fila de 12 celdas de flotación. La pulpa fluye hacia el primer banco de flotación encontrándose con un agitador en cada celda, cada una recibe un régimen controlado de gas nitrógeno para crear burbujas; cada celda en la parte superior cuenta con un colector de acumulación de gases, se dirige hacia un ducto común que alimenta al depurador húmedo de molibdeno.

Los minerales valiosos se pegan en las burbujas y son llevados a la superficie de las celdas siendo recolectadas en un canal común que alimentan al cajón de bombas de alimentación al ciclón de remolienda de molibdeno, y los que no van en la pulpa del concentrado transitan de un banco al siguiente luego hacia el espesador de concentrado de cobre.

c) REMOLIENDA DE CONCENTRADOS.-

Este proceso se realiza con la finalidad de reducir el tamaño de las partículas y mejorar su liberación, se emplea un molino de remolienda vertical; el producto permite producir una mayor ley del concentrado y rechazar partículas de mineral no deseable (ganga) en el circuito de flotación cleaner.

El concentrado rougher descarga en un cajón de bombas de alimentación a los ciclones de remolienda, estas bombas son de velocidad variable.

El nido de ciclones lo conforman 4 ciclones de 6 pulgadas; los ciclones separan las partículas más finas de las partículas gruesas. Las partículas más gruesas se descargan por el apex del ciclón, fluye hacia el cajón de bombas de alimentación al molino de remolienda y la descarga directamente cerca al fondo del molino vertical.

Las partículas más finas del ciclón (over) y la mayor parte del agua en la corriente fluye hacia el cajón de bombas de alimentación al primer cleaner de molibdeno.

Figura N° 2. 25 NIDO DE CICLONES DEL ÁREA DE FLOTACIÓN DE
MOLIBDENO.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

El molino de remolienda es accionado por un motor de 74 Kw y usa bolas de molienda en el rango de tamaño de 17-37 milímetros de diámetro. La pulpa descarga en la parte superior del molino y fluye hacia un tanque separador; luego la pulpa fluye por gravedad hacia el cajón de bombas de alimentación al ciclón de remolienda.

La eficiencia de molienda se mantiene agregando bolas en el molino, esta adición se requiere para mantener un consumo objetivo de energía del motor del molino.

La eficiencia de la operación de los ciclones se mantiene poniendo automáticamente los ciclones dentro y fuera de servicio en base a la presión del nido de ciclones.

d) FLOTACIÓN CLEANER.-

El circuito de flotación cleaner consiste en producir un concentrado final que cumpla con el requerimiento de ley y mantener una recuperación de los minerales deseados. El circuito cleaner consiste en tres etapas, y cada etapa contiene dos celdas columnares de flotación que opera en paralelo. En cada etapa una de las celdas columnares es ligeramente más grande que la otra. Para operar el número de celdas columnares en cada etapa de limpieza, depende del volumen de molibdeno en el concentrado bulk; normalmente trabajando con capacidad de diseño (70,000 tmpd), se estaría usando las celdas columnas más grande de cada etapa de limpieza.

El concentrado del primer cleaner produce alta ley y esta se alimenta al segundo cleaner. Los relaves del primer cleaner se envían a las celdas de flotación rougher, el concentrado del primer cleaner se combinan con el relave del tercer cleaner en el cajón de bomba de alimentación al segundo cleaner. La etapa del segundo cleaner produce un concentrado que es enviado al cajón de bombas de alimentación al tercer cleaner, y un flujo de relaves que regresa al cajón de bombas de alimentación al primer cleaner.

Las celdas columnas del tercer cleaner produce el concentrado final de molibdeno y se envía al espesador de concentrado de molibdeno. Los relaves del tercer cleaner fluyen al cajón de bombas de alimentación al segundo cleaner.

La distribución de la alimentación hacia las celdas columnas de flotación se realizan por medio de un cajón distribuidor, teniendo compartimientos separados para cada etapa y cuenta con válvulas dardos cada compartimiento.

e) MUESTREO Y ANÁLISIS EN LINEA.-

Los muestreadores ubicados en el circuito de flotación molibdeno permiten retirar una parte representativa de un flujo de pulpa para su evaluación en Rayos X; generalmente se envía al sistema de análisis en línea para el análisis por elementos Cu, Pb, Fe, Bi, Mo así como una determinación del porcentaje de sólidos del flujo.

El sistema de analizador de rayos X en línea es alimentado por tres multiplexores que a su vez reciben muestras de los muestreadores. Los multiplexores alimentan muestras seleccionadas hacia el analizador en base a una secuencia programada.

Los flujos de desecho del multiplexor fluyen hacia un conjunto de muestreadotes compuestos. Aquí una parte representativa de cada flujo clave es retirada en forma separada, la muestra es enviada al laboratorio para su ensayo.

Figura N° 2. 26 ANALIZADOR EN LÍNEA DE RAYOS X.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

f) SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE DE FLOTACIÓN.-

En la flotación de molibdeno, el gas que se usa para la generación de las burbujas de aire en las celdas de flotación se origina en la planta de nitrógeno; la planta de nitrógeno y el receptor de nitrógeno suministra gas a las celdas de flotación rougher y celdas columnas de flotación cleaner.

La planta de nitrógeno aspira aire normal y separa el nitrógeno; dicha planta es operada y controlada por un controlador local que arranca, detiene, carga y descarga la compresora según se requiera para mantener la presión de gas en la línea hacia el receptor de nitrógeno.

g) SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE REACTIVOS.-

Los reactivos químicos usados en flotación del molibdeno se adicionan en diversos puntos, estos promueven la flotación del molibdeno mientras que otros reactivos evitan que otros minerales floten. La dosis por etapa es la manera correcta de operar para así reducir el consumo total.

h) ESPESAMIENTO, FILTRACIÓN, SECADO Y DESCARGA DE CONCENTRADO.-

La pulpa de concentrado producto del tercer cleaner descarga al cajón distribuidor ubicado en la parte superior de los espesadores de concentrado Mo/Bi, la posición

de la válvula dado dirige el flujo al espesador de molibdeno. Se adiciona floculante para acelerar el espesamiento del concentrado y tener un porcentaje de sólidos de 60% en la descarga del espesador.

La pulpa espesada se bombea al cajón de bombas de alimentación al filtro de molibdeno, donde las partículas de concentrado se mantiene en suspensión mediante un agitador.

La filtración tiene como finalidad de eliminar el agua de la pulpa de concentrado y producir un queque de filtración con un contenido de humedad de 8 por ciento. Durante el ciclo de filtración, la bomba de lodos se enciende y apaga según se requiere para mantener el nivel deseado en el cajón de bombas de alimentación al filtro.

El filtro Larox a presión retira el agua de la pulpa de concentrado prensando la pulpa en una serie de compartimientos del filtro. Después del secado con aire a baja presión hasta aproximadamente 8 por ciento de humedad, el queque de filtración se retira de cada compartimiento. El filtro opera en una secuencia semicontinua que se controla mediante un controlador lógico programable (PLC).

Cuando se produce la descarga del queque, este cae en la faja transportadora de descarga del filtro, el producto se entrega a la tolva de alimentación al secador de molibdeno y cae en el alimentador de tornillo del secador de molibdeno. El secador de molibdeno es un tipo de alimentador de tornillo calentado; un sistema de

calefacción de aceite caliente suministra al secador, la temperatura del aceite se controla automáticamente. El aceite caliente ingresa al secador y calienta al tornillo y chaqueta del secador.

El concentrado de molibdeno seco se descarga desde la tolva mediante un alimentador de tornillo y se carga en bolsas hasta un peso determinado; siendo controlado en forma automática.

Figura N° 2.27 **SUPER SACKER EN OPERACIÓN.**



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

2.2.3.6 Circuito de flotación de Plomo/Bismuto.-

Este proceso se realiza con la finalidad de maximizar la recuperación de plomo bismuto del concentrado bulk producido en el circuito de cobre; producir un concentrado Pb/Bi vendible con 42% Pb. Y un concentrado final de cobre con muy bajo contenido de plomo y con un contenido menor de 220 ppm de Bi.

Los minerales que portan Bismuto en su composición son indeseables en el concentrado de cobre, porque si el contenido de Bi excede las 220 ppm de Bi se castigará en la comercialización el exceso. Si lo anterior ocurriera se obtendrán menores ingresos producto de las ventas de concentrado de cobre.

Por ello es importante maximizar la recuperación de Bismuto y plomo, para mejorar la calidad del concentrado de cobre final. No olvidarse de la recuperación de cobre.

a) Principales especies mineralógicas de Bismuto .-

Las principales especies mineralógicas de bismuto son Aikinita (CuPbBiS_3), Bismutinita (Bi_2S_3), Cosalita ($\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$) y la del plomo es la Galena (PbS)

b) Circuito de separación.-

El circuito de separación es un componente clave en la concentradora de Antamina. El circuito es esencial para reducir el contenido de Bi/Pb en el concentrado de cobre; de no realizar ésta operación gran parte del concentrado de cobre no sería vendible.

La técnica de separación del Bismuto es una típica separación Pb/Cu con la particularidad de que cuando la flotación de minerales de plomo finaliza se inicia la de minerales de Bismuto, es importante que el operador del circuito identifique en que punto de su circuito rougher se está iniciando la flotación de bismuto.

Es necesario identificar lo anterior porque, de no saberlo se emplearían muy pocas o muchas celdas para la flotación de Bi, afectando así la recuperación de Bi o la de cobre, respectivamente.

Figura N° 2. 28 CELDAS DE FLOTACIÓN PLOMO/BISMUTO.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Primero es necesario dosificar carbón activado para adsorber los reactivos residuales no deseados que aún permanecen en la pulpa. Este se agrega a los tanques de almacenamiento y al acondicionador.

2.2.4 Proceso de transporte de mineral.-

Culminada la flotación de minerales Antamina almacena los concentrados en tanques, pero para maximizar la capacidad de estos tanques es necesario espesarlos para aumentar su porcentaje de sólidos y tener más capacidad de almacenamiento antes de enviarlos por el mineroducto hasta el puerto donde serán filtrados y transportados a su destino final.

2.2.4.1 Operaciones de espesamiento.-

En el proceso de concentración de minerales, la separación Sólido - Líquido, consiste en la eliminación de agua de los concentrados que producimos, la cual se realiza en etapas de espesamiento (Concentradora) y Filtrado (Puerto).

Figura N° 2.29 TANQUES DEL ESPESADOR DE CONCENTRADO DE ZINC Y COBRE.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

El espesamiento ocurre por Sedimentación de las partículas. En esta etapa se producen dos productos Lodos de 60 a 65% de sólidos y simultáneamente líquidos turbios conteniendo menos de 100 NTU de sólidos.

El proceso de sedimentación se realiza en espesadores que en su modelo tradicional, son recipientes de forma cilíndrica con fondo cónico con un gran

ángulo de inclinación. Durante su funcionamiento pueden distinguirse las siguientes zonas:

a) Zona de Rebose.- Donde se tiene agua clara ó con mínima proporción de sólidos que fluyen hacia arriba y rebosa por los bordes del espesador.

b) Zona de Sedimentación.- Lugar donde la pulpa de concentrado ingresa para su sedimentación se caracteriza porque el % de sólidos es igual al % de sólidos de la alimentación.

c) Zona de Transición.- Es un estado intermedio en la cual la pulpa de concentrado esta en un estado de transición entra la sedimentación libre de obstáculos y la compresión.

d) Zona de Compresión.- Denominada así por que los sólidos eliminan parte del agua por compresión de las partículas que fuerzan al líquido salir de los intersticios del lodo espesado.

La mayor parte del líquido contenido en la alimentación fluye hacia el rebose. El líquido restante es descargado con los sólidos por la parte inferior y central del espesador.

Funcionamiento de un Espesador Continuo.-

Cuando una pulpa de concentrado ingresa al espesador, los sólidos sedimentan al fondo. El líquido clarificado rebosa por la parte superior y los sólidos

sedimentados son removidos por los rastrillos hacia el cono del espesador para su posterior evacuación.

En la operación de sedimentación influyen varios factores a continuación estudiaremos algunos de ellos:

Granulometría de la alimentación: Es importante controlarlo debido a partículas gruesas generarían problemas de sedimentaciones bruscas con riesgo de daño en el mecanismo de los rastrillos y desgaste por abrasión en el mineroducto.

Área del espesador.- Debe proveer suficiente tiempo de retención para permitir que la sedimentación de la partícula más lenta alcance el fondo de la unidad.

Velocidad de evacuación del rebose.- Debe ser lo mas lenta para evitar el arrastre de partículas y enturbiar el rebose.

Tiempo de retención.- Debe ser lo suficientemente razonable para permitir la separación de las partículas de sedimentación lentas del rebose, un tiempo de residencia muy largo puede resultar en una sobrecarga en el mecanismo del espesador.

Alimentación al espesador.- Debe ser lo más lenta posible, altas velocidades originaría que la zona de sedimentación, transición y compresión se distorsione , el resultado puede ser el descenso de la concentración de sólidos en los lodos y el incremento en el rebose del espesador.

Si la alimentación al espesador viene de una etapa de flotación como es en nuestro caso y si esta pulpa de concentrado tiende a formar espumas esta flotará sobre la superficie del líquido causando pérdidas de sólidos en el rebose.

Los concentrados producidos por nuestra planta requieren de la adición de un reactivo químico (floculante) para promover la formación de flóculos sedimentables de las partículas finas dispersadas.

2.2.4.2 Mineroducto.-

El mineroducto tiene una longitud de 302 Kilómetros, se inicia en la estación de bombas en la mina y termina en la estación terminal de Huarmey. El mineroducto es una tubería de acero de alta resistencia con un revestimiento interior de polietileno de alta densidad (HDPE) para proteger la tubería contra la abrasión y la corrosión.

Figura N° 2. 30 CONSTRUCCIÓN DEL MINERODUCTO.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

a) ESTACIONES DE MONITOREO DE PRESION.-

El mineroducto cuenta con cuatro estaciones de monitoreo de presión para registrar condiciones intermedias dentro de la tubería. Estos datos sumados a los datos de presión disponibles en las estaciones de válvulas nos proporcionan información para la toma de decisiones.

Adicionalmente, estos datos (junto con la estación de bombas, la estación de válvulas y los datos del terminal) proporcionan la información necesaria para el

sistema de detección de fugas en el mineroducto que se encuentra en el Pipeline Advisor.

Figura N° 2.31 Estación de monitoreo de presión.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

b) ESTACIONES DE VALVULAS.-

Hay cuatro estaciones de válvulas intermedias así como una estación de válvulas en el terminal. Estas estaciones de válvulas tienen dos funciones principales:

- Dividir la cabeza estática durante las paradas del mineroducto.
- Eliminar el exceso de cabeza durante la operación.

Durante las paradas del mineroducto con pulpa, las estaciones de válvulas dividen la presión estática evitando un exceso de presión. Las válvulas se cierran en una frecuencia previamente establecida, y mantienen la tubería llena. Se requiere de las válvulas en los cinco lugares para detener en forma segura el mineroducto.

Se han instalado estranguladores cerámicos (Chokes) para permitir una operación estable dentro del rango de operación del mineroducto.

Con bajos flujos o bombeo de agua, las pérdidas por fricción son menores. Se requiere entonces de estrangulamiento adicional para mantener la tubería llena.

Figura N° 2.32 ESTACIÓN DE VÁLVULAS.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

2.2.4.3 Sala de bombeo.-

La sala de bombeo comprende: el cuarto de control, la estación de bombas y el cuarto de control de motores. El cuarto de control es el punto neurálgico del

mineroducto, desde donde se monitorea el funcionamiento de los equipos de la estación de bombas y de todo el trayecto de aquel, mediante las HMI y cámaras de video.

Figura N° 2.33 SALA DE CONTROL DEL MINERODUCTO



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

La estación de bombas es el lugar donde se ubican las bombas principales (Wirth), bombas de carga y de sumidero, tanques de almacenamiento y el inicio de la línea

del mineroducto.

Figura N° 2.34 BOMBAS WIRTH.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

En el cuarto de control de motores se encuentran los paneles de abastecimiento de energía normal y de respaldo, el panel de distribución de fibra óptica, el gabinete de control del PLC y los controladores de frecuencia variable de las bombas de la estación y de los espesadores.

2.2.5 Proceso de embarque del mineral.-

El área del puerto se ubica en Punta Lobitos a la altura del kilómetro 290 de la carretera Panamericana Norte de Lima, en la provincia de Huarvey, departamento

de Ancash. La propiedad se extiende desde la Carretera Panamericana Norte hasta la costa del Océano Pacífico a lo largo de la península Cabeza de Lagarto, al suroeste de la ciudad de Huarmey.

El área del puerto cuenta con instalaciones cuyos objetivos principales son el proporcionar un manejo adecuado a los concentrados que llegan a través del mineroducto para su desaguado, almacenamiento, carga y transporte en barco; y proporcionar un manejo adecuado al exceso de agua que se genera como consecuencia del desaguado del concentrado.

El sistema de manejo de concentrados permite recibir concentrado en forma de pulpa y tiene una capacidad de 160 000 toneladas secas. El concentrado es cargado en buques de hasta 50 000 toneladas secas de capacidad mediante un sistema transportador totalmente cerrado. Las instalaciones están programadas para operar durante todo el año y actualmente atienden a un promedio de 72 buques al año.

Los principales componentes del puerto se pueden dividir en:

- Área de recepción y planta de filtros.
- Área de almacenamiento y embarque.
- Área de tratamiento de efluentes.

2.2.5.1 Área de recepción y planta de filtros.-

Los tipos de concentrado que se producen en la concentradora son:

- Concentrado de cobre con bajo contenido de bismuto
- Concentrado de cobre con alto contenido de bismuto
- Concentrado de zinc

Estos tres tipos de concentrado se almacenan como pulpas al 60% de sólidos en tanques separados ubicados en la concentradora, se transporta a través del mineroducto en tandas separadas por agua y se mantienen en tanques separados en las instalaciones de Puerto Huarmey antes de la filtración.

La supervisión del mineroducto en estrecha comunicación con la concentradora y las operaciones de filtración elaboran un programa semanal real de tal manera que todos sepan cuándo se van a enviar los diferentes concentrados a través del mineroducto. Este programa se debe actualizar en forma diaria, el cual juntamente con el sistema de monitoreo continuo conocido como "Advisor" permite al operador de la planta de filtración anticipar el preciso instante en que debe maniobrase las válvulas así como realizar un programa de filtración a fin de manejar los stocks de los tanques así como también de las pilas de concentrados, permanentemente.

La pulpa de concentrado con una concentración de sólidos de aproximadamente 58% a 62%, se descarga desde el mineroducto al distribuidor general de concentrados, desde donde se envía hacia el distribuidor específico, ya sea de

concentrado de cobre ó de zinc. El mineroducto cuenta con medidores de densidad y conductividad antes de los distribuidores de concentrado. Existen alarmas que se activan cuando la densidad es baja como resultado de que fluya agua por el mineroducto ó cuando la conductividad es alta momentos antes del arribo del concentrado de zinc. Estas alarmas alertan al operador para dirigir el flujo hacia el clarificador de concentrado en vez de a los tanques de almacenamiento, ayudando a evitar que la pulpa se diluya en los tanques de almacenamiento.

El régimen de diseño es de 263 m³/hora pero en la práctica alcanza hasta los 300 m³/hora ó 330 T.M./hora de concentrado base seca. Tanto el distribuidor de concentrado de cobre como de zinc dirige la descarga del mineroducto hacia los diferentes lugares de la planta.

Los tanques de almacenamiento cuentan con un agitador para mantener en suspensión los sólidos contenidos en la pulpa. Los tanques tienen aproximadamente 2.250 m³ de capacidad viva, lo que es equivalente a aproximadamente 2.270 T.M. de concentrado en base seca, ó aproximadamente 7.5 horas de envío de pulpa por el mineroducto.

a) Planta de filtración.-

La filtración es la separación de las partículas sólidas de un fluido, haciendo pasar el fluido por un medio filtrante en el que se acumulan los sólidos. La capacidad del equipo de filtración se especifica por el área de superficie necesaria para procesar la cantidad requerida del producto. Los filtros pueden trabajar en dos formas básicas.

La filtración a presión constante y la filtración a régimen constante, la cual requiere de un incremento gradual de la presión a medida que se engruesa la torta y aumenta la resistencia al flujo. Un procedimiento común consiste en utilizar un régimen de flujo constante hasta que la presión aumenta a un cierto nivel y efectuar la filtración a presión constante durante el resto del tiempo. Este ciclo puede lograrse convenientemente utilizando bombeo centrífugo y tiene la ventaja de formar una torta inicial de estructura mas bien suelta, la cual minimiza la cantidad de sólidos que se fuerza dentro y a través del medio.

b) Área de filtros.-

Cuando el operador abre la válvula de descarga del tanque respectivo, la pulpa de concentrado fluye por gravedad desde el tanque de almacenamiento de concentrado respectivo hasta el tanque de alimentación al filtro, de acuerdo a la demanda. Cuatro bombas de alimentación al filtro (una para cada uno de los cuatro filtros de concentrado) entregan pulpa de concentrado desde el tanque de alimentación hasta los filtros respectivos como parte del ciclo automático de operación del filtro.

En el filtro LAROX PF, las placas están dispuestas horizontalmente entre dos placas principales de compresión: la placa superior é inferior de compresión. El paquete de placas se cierra durante la filtración. Los sólidos secos formados durante el proceso de filtración son descargados mientras el paquete de placas se encuentra abierto. El paquete de placas se abre y cierra mediante cilindros hidráulicos.

La tela filtrante sinfín zigzaguea entre las placas, razón por la cual se forman tortas en ambos lados de la tela. Mientras el filtrado pasa a través de la tela, remueve las partículas sólidas que quedaron atrapadas en ciclos de filtración previos.

La tela transporta las tortas hacia fuera del filtro y al mismo tiempo es lavada por ambos lados por chorros de agua a alta presión. La unidad motriz de la tela es operada con un motor hidráulico, el cual actúa sobre el rodillo motriz. La tensión de la tela filtrante es mantenida constante mediante un sistema tensor. El mecanismo tensor de tela no opera cuando el paquete de placas está cerrado.

La pulpa de concentrado es alimentada a las cámaras de filtrado a través de un tubo distribuidor ubicado en ambos lados del filtro. Asimismo, el agua de lavado y aire de secado ingresan por la misma vía. El tubo distribuidor se vacía mediante válvulas de drenaje.

La operación automática del filtro es controlada por un panel de control que incluye una pantalla y botoneras.

Figura N° 2.35 FILTRO LAROX.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

La operación automática de las válvulas trabaja hidráulicamente, excepto aquellas válvulas de aire de prensado, que poseen actuadores neumáticos.

Como se mencionó a parte de suministrarse agua de proceso a los cuatro filtros de concentrado para el lavado de tuberías y mangueras, también se requiere de aire de alta presión para prensar el queque de filtración y aire de baja presión para secar el queque de filtración. Los filtros tienen suficiente capacidad para permitir la producción completa con tres filtros mientras que uno de ellos se para con la

finalidad de darle mantenimiento. Los filtros producen un queque con aproximadamente 8 por ciento de humedad que cae desde los filtros hacia la faja transportadora de descarga de filtros para conducirlos hacia la pila de acopio de concentrados.

El filtrado (agua con pequeña cantidad de sólidos) y el agua de lavado de tuberías de alimentación, agua de lavado de tela filtrante, etc., fluyen desde cada filtro de concentrado hacia el tanque de filtrado, ya sea en forma directa ó a través de un tanque de alivio para aire. Cuando el operador abre las válvulas de transferencia apropiadas, dos bombas de transferencia de filtrado, una operando y otra en standby, entregan filtrado desde el tanque de filtrado hasta el cajón de alimentación del clarificador del concentrado que se esté filtrando.

La operación del filtro es controlada por cronómetros de valores preestablecidos en el panel del PLC. Estos tiempos cronometrados, puede que necesiten ser ajustados periódicamente en base al contenido de humedad del producto final de concentrado que se está filtrando. Cuando se usa más de un filtro al mismo tiempo, el PLC coordina las secuencias de cada filtro de manera que no falte aire comprimido, agua de lavado de telas y tuberías.

En las secuencias se asume que están operando las compresoras de aire de baja (aire de secado) y alta presión (aire de prensado). El sistema de control Automático arranca y detiene la unidad hidráulica automáticamente según se requiera, pero también puede operarse el filtro en modo Manual por etapa si se requiere. La

secuencia automática para el filtrado de concentrado consta de los siguientes pasos:

a) Llenado de concentrado.-

Con las placas del filtro cerradas y selladas por medio del cierre hidráulico, se abren las válvulas de ingreso de pulpa de concentrado hacia las 22 cámaras del filtro. La bomba de alimentación al filtro eleva su velocidad de revoluciones de una manera gradual hasta llegar a la velocidad máxima y la pulpa ingresa por las tuberías de distribución a las cámaras. Durante esta etapa, la válvula de aire de prensado está en posición de descarga para dejar que el aire que pueda quedar en la cámara de prensado escape a medida que el diafragma es desplazado hacia la parte superior de la placa base. A medida que se bombea la pulpa a las cámaras, la presión aumenta y el filtrado (líquido en la pulpa) pasa a través de la tela filtrante y deja el filtro por los colectores del filtrado. El queque se forma sobre la tela filtrante a medida que el filtrado sale. Si la bomba de alimentación al filtro falla durante este paso, el control del filtro automáticamente realiza una parada ordenada.

b) Lavado de las Tuberías de distribución.-

La bomba de alimentación al filtro se detiene y las válvulas de ingreso de pulpa de concentrado se cierran. El agua de lavado proveniente del tanque de agua de

proceso se usa para lavar las tuberías de distribución múltiple del filtro. Entonces la válvula de lavado del distribuidor se abre para luego abrirse las válvulas de salida del drenaje de las tuberías de distribución a fin de que se evacúe la pulpa que pueda quedar en las líneas de distribución.

c) Lavado de la Manguera.-

Las válvulas de salida de drenaje del distribuidor se cierran para que se pueda lavar la pulpa de las mangueras de alimentación. El agua fluye por las mangueras llenándolas con dirección hacia las cámaras del filtro hasta que el cronómetro llega al final del tiempo establecido.

d) Prensado.-

La válvula de aire de prensado cambia a la posición Ingreso y se suministra aire de alta presión (200 psig) hacia cada cámara del filtro entre el diafragma y la placa base superior. Esto empuja el diafragma contra el queque del filtro, prensando el queque contra la tela filtrante, separando el filtrado del queque. Cuando el tiempo cronometrado llega al final del tiempo establecido, la válvula de aire de prensado cambia a la posición Descarga.

e) Drenaje del Distribuidor Múltiple.-

La válvula de aire de prensado está en la posición Descarga para liberar la presión en la cámara hacia la atmósfera a través del silenciador de aire de prensado. Las

válvulas de salida del drenaje del distribuidor se abren ligeramente para dejar que el agua que quedó en los distribuidores drene.

f) Secado con aire.-

El secado final del queque se logra con aire comprimido de baja presión (100 psig). La válvula de ingreso de aire de secado se abre y el aire comprimido de baja presión ingresa a cada cámara del filtro y sale por el colector del filtrado. El aire de secado empuja el diafragma hacia la placa base superior y el aire de prensado que pueda quedar por encima del diafragma sale a la atmósfera por la válvula de salida de aire de prensado. El aire de secado fluye por el queque y reduce el contenido de humedad y al mismo tiempo vacía la cámara de filtrado. Cuando la señal del cronómetro de secado llega al final del tiempo establecido, la válvula de ingreso de aire para secado se cierra.

g) Descarga de Concentrado.-

Si la faja transportadora que recibe las descargas de los filtros está funcionando, las válvulas de drenaje del distribuidor múltiple se abren para liberar cualquier presión. Luego el conjunto de placas se separa mediante cilindros hidráulicos. Arranca el motor de accionamiento de la tela filtrante. El concentrado en la tela filtrante se descarga hacia la faja transportadora por ambos extremos del filtro.

h) Lavado de la Tela Filtrante.-

Con la finalidad de mantener las propiedades filtrantes de la tela, una parte de la misma se lava después de cada ciclo de filtración. Este lavado tiene lugar después de que la tela filtrante deja la última placa del filtro. La válvula de agua de lavado se abre y fluye por los sprays de lavado de tela.

i) Cierre Mecánico.-

El conjunto de placas se cierran mediante cilindros hidráulicos. El filtro se encuentra ahora listo para comenzar otra secuencia.

El filtrado obtenido contiene entre 2 a 5 por ciento de sólidos. Una bomba transfiere el filtrado desde un tanque de recepción hacia el cajón de alimentación del clarificador del concentrado que se está filtrando.

j) Área de clarificadores.-

Un Clarificador consiste de un tanque grande para permitir que los sólidos de una mezcla de sólidos y agua (ya sea pulpa ó agua turbia) se sedimenten. Luego, los sólidos sedimentados son llevados mediante un rastrillo de movimiento lento hasta un cono de descarga central para ser bombeados hacia el tanque de almacenamiento que corresponde a los sólidos.

El clarificador de concentrados realiza dos funciones principales:

- Deja que los sólidos del filtrado y de otras suspensiones se sedimenten de manera tal que el rebalse (agua clara) pueda ser tratado en la planta de tratamiento

de efluentes para hacerla adecuada para irrigación ó reutilizarla como agua de proceso.

- El clarificador permite a los sólidos sedimentados formar una pulpa de descarga de aproximadamente 40-60 por ciento de sólidos que puede bombearse a los tanques de almacenamiento de concentrado.

k) Sedimentación.-

Es la separación de partículas sólidas en suspensión de un líquido, que se produce por asentamiento debido a la gravedad. Tal operación puede dividirse en espesamiento y clarificación. Aunque se rigen por principios semejantes, estos procesos difieren en que el objetivo primario del espesamiento es incrementar la concentración de sólidos, mientras que la clarificación sirve para separar los sólidos de una corriente relativamente diluida. Se usan floculantes como auxiliares para la sedimentación, ostensiblemente para incrementar la velocidad de asentamiento. Aunque de hecho aumentan las velocidades, el logro significativo es el agrupamiento de las partículas en flóculos de tamaño relativamente uniforme, con lo cual la pulpa se asienta con una interface bien definida.

Los clarificadores de concentrado de cobre y zinc son tanques cilíndricos de base cónica, los cuales poseen un rastrillo giratorio. Estos tanques tratan dos flujos –el filtrado proveniente de los filtros de concentrado y las cantidades de agua que separan de las tandas de concentrados de diferente batch ó tipo provenientes por

el mineroducto para producir un derrame claro. En alguna situación, el clarificador también puede tratar pulpa de concentrado de baja concentración de sólidos que se recibe directamente del mineroducto a fin de incrementar su concentración. El clarificador produce un derrame con menos de 25 partes por millón (ppm) de sólidos para entregarlos por gravedad a la poza de tratamiento de efluentes.

Figura N° 2.36 **OVER FLOW DEL CLARIFICADOR.**



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Para acelerar la sedimentación de los sólidos se añade floculante al clarificador de concentrado, pero no debe excederse en su uso debido a que el floculante es un reactivo costoso y también a que se puede producir una condición de “sobrefloculación” lo que lleva a condiciones “limosas” en el espesado y a

problemas en el posterior funcionamiento del filtro de concentrado. Se debe evitar que se acumulen sólidos en el fondo del clarificador hasta el punto que el mecanismo del rastrillo se pare debido al alto torque.

La pulpa espesada del clarificador se bombea hacia el tanque de almacenamiento de concentrado mediante una de las dos bombas que se encuentran debajo del clarificador ó “underflow”. Una de las bombas, la más pequeña, recircula la pulpa hacia el mismo clarificador para incrementar la densidad de la pulpa al rango deseado (40-60% de sólidos) antes de transferirla al tanque de almacenamiento – modo Clarificador -, la otra bomba puede transferir únicamente pulpa espesada al clarificador en gran flujo a una concentración en el rango de 65-70% de sólidos – modo Espesador . La selección de la bomba depende del modo de operación seleccionado para el clarificador.

2.2.5.2 Área de almacenamiento y embarque.-

En el mundo del comercio, las mercancías siguen una cierta consecuencia de movimientos en el interior, un sistema llamado “La distribución física y global”.

En el interior del sistema de distribución física global de las mercancías se encuentra un elemento esencial: EL TRANSPORTE.

En función a ciertos criterios se va a recurrir al transporte marítimo ya que no hay otras posibilidades físicas debido a que las cantidades a transportar son demasiado

importantes y el transporte por mar es la única posibilidad o bien por aspectos de “economía a escalas”.

En el área de embarque se realizan el almacenamiento de concentrado seco, la operación de los equipos de embarque y embarcar el producto en las bodegas de las naves que arriban al puerto con ese propósito.

Figura N° 2.37 EL ÁREA DE PUERTO CARGANDO UN BUQUE.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Una vez filtrados los concentrados en la planta de filtros y con una humedad que varía entre 8.5 y 9%, son enviados al almacén de concentrados mediante la faja C2

y son descargados desde lo alto del techo del almacén por un apilador de concentrados (Tripper) que corre longitudinalmente por la extensión de la faja C2.

Figura N° 2.38 PILA DE ALMACENAMIENTO DE CONCENTRADO



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

El almacén de concentrados es un edificio con capacidad real para 160,000 toneladas de concentrados en 3 pilas, nosotros apilamos en el Sur los concentrados de Zinc, en el medio los concentrados de Cobre con bajo bismuto y hacia el Norte los concentrados de Cobre con alto bismuto; a veces se forma una cuarta pila con

concentrados de Cobre con muy alto contenido de bismuto, es necesario notar que debido al ángulo de reposo característico del mineral (38 a 39°) las pilas que se forman son de amplia base y mientras más pilas diferentes se manejen dentro del almacén menor será la capacidad total del mismo.

Es importante resaltar que dentro del almacén podemos realizar mezclas de concentrados (blending) con diferentes niveles de bismuto para conseguir un nivel de bismuto acorde con lo requerido en el contrato de venta internacional.

Dentro del almacén trabajan dos cargadores frontales abasteciendo a las tolvas de los alimentadores móviles de la faja C3 (hoppers), contamos con un caterpillar 988F y uno 988G

Los hoppers tienen una compuerta de guillotina de ajuste manual (4 posiciones). Las fajas transportadoras de los hoppers son movidas por motores eléctricos con velocidad variable para regular la descarga de concentrado. Cada hopper está diseñado para dar una descarga máxima de 1,200 tons/ hr.

La Faja Transportadora C3 (conveyor 3) corre a todo lo largo del almacén de concentrados. Sobre el conveyor 3 van montados en forma de puente los dos hoppers. Los últimos 35 metros del conveyor van a través de un ducto, el cual termina en una torre de transferencia. En el interior de la misma torre se encuentra el chute de transferencia, el cual entrega el concentrado al conveyor 4.

La Faja Transportadora C4 (conveyor 4), nace en la parte inferior de la torre de transferencia 1, y corre en el interior de un ducto montado sobre pórticos de tubos a lo largo de todo el puente hacia el muelle del shiploader, desde la torre de transferencia 1 hasta la torre de transferencia 2.

Figura N° 2.39 CARGADOR FRONTAL ABASTECIENDO FAJA DE ALIMENTACIÓN.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Adyacente a la torre de transferencia 1, se encuentra el cuarto del muestreador (sampler station), donde automáticamente se toman muestras del concentrado

cuando este pasa por el conveyor C4 con un sistema de cortes; precisamente el cortador primario del muestreador se encuentra montado encima del conveyor 4.

Cerca de la cola del conveyor 4 pero adelante del muestreador, se ubica un sistema de báscula de pesaje de precisión en cinta marca RAMSEY, el que indica la cantidad de concentrado que se está embarcando a un determinado buque y es la balanza oficial del puerto, con su lectura final se confecciona el Ticket de Balanza que será entregado al Resguardo Aduanero para su constatación y firma.

- **El Cargador Radial de Barcos (Shiploader).-**

El cargador radial de buques consiste en una pluma de embarque de mineral que puede levantarse, bajarse y girarse, contando en su extremo final con un chute telescópico. La pluma está diseñada para cargar buques de carga general y graneleros de 15,000 TRB a 50,000 TRB (toneladas registradas brutas).

El cargador de buques se compone esencialmente de una superestructura en forma de torre, con anillo de rodadura para el mecanismo de giro, una plataforma giratoria con el mecanismo de giro, cuarto hidráulico, mecanismo de elevación hidráulico, cabina del operador y cuarto eléctrico, una pluma de carga levatable, bajable y telescópica con elementos para la faja transportadora, accionamiento de la faja y chute de carga, contrapeso y caja del mismo.

Se trata de un cargador de buques estacionario colocado en una estructura en forma de torre, la cual está montada en el muelle. La cabina con asiento del operador se encuentra en la parte delantera de la pluma principal.

Los elementos de la faja del shiploader (conveyor 5), como los rodillos, polines, tambores (poleas) están equilibrados estática o dinámicamente, según sea su aplicación. Estas medidas garantizan un funcionamiento de los elementos del conveyor suave y seguro, contribuyendo a aumentar la seguridad del cargador.

El cargador cuenta con dos colectores de polvo, instalados en la parte superior y cerca de los chutes de transferencia: recepción (parte posterior), y descarga (parte delantera). Este sistema elimina el polvo producido por la caída de concentrado a los chutes de transferencia.

Figura N° 2.40 **CARGADOR SHIPLOADER.**



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Adicionalmente dentro de la pluma lleva instalado, para fines de limpieza, un sistema completo de colector de vacío con tuberías y conexiones distanciadas adecuadamente para una fácil limpieza. Este sistema tiene una conexión principal para acoplamiento del vehículo de vacío (Vacuum Truck).

El cargador puede ser operado de tres maneras, a saber: en modo local, modo escritorio y en modo remoto. En modo local, sólo puede ser operado para casos de mantenimiento. En modo escritorio, la responsabilidad de operación la tiene el operador de la cabina; y en modo remoto, la responsabilidad de operación recae sobre el operador que porta el control remoto a bordo de la nave que se está cargando.

Figura N° 2.41 LLENADO DE LAS BODEGAS DE UN BUQUE.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

2.2.6 Proceso de tratamiento de efluentes.-

Un efluente es todo tipo de residuo industrial que genera las Industrias, también tenemos efluentes de las ciudades que circulan a través de la red de tuberías de desagües y es tratado en plantas adecuadas.

De igual manera las actividades de recepción y filtración de concentrados en Punta lobitos genera efluentes líquidos que a pesar de cumplir con los requisitos para riego, será tratados para regular su pH a 7 y la concentración de cianuro será reducido aún mas mediante tratamiento con peróxido de hidrogeno.

El efluente proviene del agua que se usa para poder transportar el concentrado desde la mina a través del Mineroducto de 302 km, este debe estar mezclado con agua y formando una pulpa de 62% de densidad en peso aproximadamente.

También como tenemos solo un mineroducto (una tubería) para transportar dos tipos de concentrado Cobre y Zinc, se requiere ingresar una tanda de agua de 8 horas aproximadamente entre concentrados enviados para que no se mezclen entre ellos, el cual perjudicaría la calidad del concentrado.

La pulpa de concentrado de cobre es filtrada donde obtenemos dos productos: Concentrado a granel con 8% de humedad y liquido con una parte muy pequeña de sólidos (aproximadamente 5% de sólidos), luego este líquido va hacia el clarificador de cobre para poder separar los sólidos por sedimentación y el agua de rebalse va hacia la poza de efluentes.

Por otro lado la pulpa de concentrado de Zinc también sigue el mismo proceso que la pulpa de concentrado de cobre, pero este tiene un Clarificador exclusivo. El rebalse del Clarificador de Zinc normalmente es enviado hacia la Poza de Efluentes o también puede ser enviado directamente hacia el Tanque de agua de Procesos dependiendo de la turbidez que pueda tener. (ver el siguiente diagrama)

También el agua que viene entre los batches de concentrado, puede pasar directamente hacia la poza de efluentes o hacia el clarificador Cobre y Zinc según sea el contenido de turbidez.

La Planta de Filtración y Clarificación procesa tres efluentes que ingresa a la Planta de Tratamiento de Efluentes:

- a) Agua del rebalse del clarificador de Cobre proveniente de la pulpa filtrada, esta agua puede contener algunas trazas de Cianuro y metales disueltos como resultado de los reactivos usados en la concentradora para la flotación.
- b) Agua del rebalse del clarificado de Zinc proveniente de la pulpa filtrada, esta agua puede contener trazas de metales disueltos y sólidos suspendidos.
- c) Agua entre batches de concentrado, este puede pasar directamente hacia la poza de efluentes o hacia el clarificador Cobre y Zinc según sea el contenido de turbidez.

La planta de tratamiento de efluentes tiene la finalidad de producir un efluente que cumpla o mejore todas las normas de calidad de agua Peruanas e Internacionales, en especial aquellas relacionadas con agua de irrigación.

También se pretende asegurar un suministro uniforme de agua de proceso para las facilidades portuarias.

2.2.6.1 PROCESO DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL PUERTO PUNTA LOBITOS.-

Los efluentes contienen cianuro y metales disueltos, para lo cual durante una operación normal se envía el efluente desde la poza de efluentes mediante dos bombas sumergibles a un caudal de 300m³/hr aproximadamente hacia los 3 tanques reactores de agitación en serie; la solución fluye de un tanque hacia otro por gravedad.

El peróxido de hidrogeno y sulfato de cobre se agrega al primer tanque de la serie para destruir casi todo el cianuro que pueda estar presente ya sea en forma de Cianuro Wad (Cianuro disociable con ácido débil) o Cianuro Total que incluye complejos de Ferrocianuros. La meta es reducir todo el contenido de Cianuro a menos de 1 ppm o menos de 1 gramo de cianuro total por cada metro cúbicos o (1,000 litros de agua).

En el primer tanque se agrega casi la totalidad del Peroxido (80% del total) muy cerca a la tubería de ingreso del efluente, luego una parte del sulfato de cobre (20%) un poco más alejado del peroxido de hidrogeno. Luego en el segundo tanque se agrega el remanente de peroxido y sulfato de cobre. Tanto en el primer tanque como en el segundo tanque el pH se mantiene alrededor de 9.5 con ayuda de lechada de cal. Los agitadores de los tanques mezclan completamente los reactivos

con el efluente. En el segundo tanque se agrega coagulante para ayudar a colectar todas las partículas que se encuentran presentes.

En el tercer tanque se agrega mas lechada de cal para llevar el pH hasta 10 con el fin que todos los metales disueltos sean convertidos a hidróxido insoluble o partículas sólidas y también se agrega floculante; luego toda esta mezcla fluye por gravedad hacia el clarificador de efluentes (Espesador de rastrillo rotativo que remueve los sólidos del efluente tratado)

En el clarificador de efluentes la pulpa espesada es recirculada hacia el segundo tanque a través del tanque de premezcla (con ayuda de dos bombas horizontales centrífugas), el cual sirve para ayudar a la colección de los metales precipitados.

Los tanques reactores y de premezcla poseen agitadores para mantener los sólidos en suspensión y mezclar homogéneamente el liquido con los sólidos y los reactivos.

El rebalse del clarificador de efluentes es un líquido libre de cianuro y metales disueltos, pero aún contiene pequeñas partículas de sólidos suspendidos y pH cerca a 10. Es por esta razón que esta agua es enviada hacia una batería de filtros de arena (con ayuda de dos bombas centrífugas) con el objetivo de remover cualquier sólido remanente. Los filtros de arena están provistos de capas de arena fina de granate y sílice y dos capas de gravas gruesas en cada tanque.

Regularmente los filtros de arena son lavados en contracorriente para retirar los sólidos capturados hacia la Poza de efluentes.

Seguidamente el agua muy clara pasa hacia el tanque de neutralización que sirve también como tanque de bombeo del agua tratada hacia la Poza de Irrigación. Para la neutralización se usa Ácido Sulfúrico al 98% de pureza el cual es adicionado en forma automática con dos bombas peristálticas de acuerdo al requerimiento del agua.

2.2.6.2 PROCESO DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES QUE NO CONTIENE CIANURO Y METALES DISUELTOS.-

Cuando se recepciona el concentrado de Cobre de Bajo Bismuto normalmente el agua que le acompaña No contiene Cianuro ni Metales disueltos; en este caso es necesario solamente remover los sólidos suspendidos y neutralización correspondiente.

Durante este tipo de Operación se envía el Efluente desde la Poza de Efluentes mediante dos bombas sumergibles a un caudal de 300m³/hr aproximadamente hacia los 3 tanques reactores.

Es conveniente analizar por Cianuro total o Cianuro Wad para asegurarnos que no contenga residuos de Cianuro y poder aplicar el presente tratamiento; Tanto en el primer tanque como en el segundo tanque se adiciona cal necesaria para llevar el pH alrededor de 9.0. Los agitadores de los tanques mezclan completamente la

Lechada de Cal con el efluente. En el segundo tanque se agrega coagulante para ayudar a colectar todas las partículas que se encuentran presentes.

En el tercer tanque se agrega floculante; luego toda esta mezcla fluye por gravedad hacia el Clarificador de Efluentes. En el Clarificador de Efluentes la Pulpa espesada es recirculada hacia el segundo tanque a través del tanque de premezcla (con ayuda de dos bombas horizontales centrífugas), el cual sirve para ayudar al crecimiento de los sólidos sedimentados.

Los tanques reactores y de premezcla poseen agitadores para mantener en suspensión los sólidos y mezclar homogéneamente el líquido con los sólidos y los reactivos.

El rebalse del clarificador de efluentes aún contiene pequeñas partículas de sólidos suspendidos y pH alrededor de 9, por esta razón este agua es enviada hacia una batería de filtros de arena con el objetivo de remover cualquier sólido remanente. Los filtros de arena están provistos de capas de arena fina de granate y sílice y dos capas de gravas gruesas en cada tanque.

Seguidamente el agua muy clara pasa hacia el tanque de neutralización que sirve también como tanque de bombeo del agua tratada hacia la Poza de Irrigación. Para la neutralización se usa Ácido Sulfúrico al 98% de pureza el cual es adicionado en forma automática con dos bombas peristálticas de acuerdo al requerimiento del agua.

2.2.6.3 TRATAMIENTO DE AGUA PARA EL PROCESO.-

El agua de proceso se obtiene a partir del agua tratada en la Planta de Tratamiento de Efluentes, es muy importante mantener un constante suministro de agua de Proceso en las facilidades portuarias ya que la Planta de Filtración, Planta de Reactivos, agua de limpieza y agua del sistema contra incendio utiliza esta agua.

Durante el primer arranque de la Planta o después de una parada prolongada se tendrá especial cuidado en almacenar agua de proceso en cantidades adecuadas para poder iniciar la Operación de la Planta sin contratiempo por falta de agua.

El agua en mención se obtiene después de los filtros de arena, cuando este llega hacia el tanque de efluentes tratados y antes que pase al tanque de alimentación de las bombas de Irrigación.

En el tanque de efluentes tratados dos bombas centrifugas envía el agua hacia el tanque de almacenamiento de agua de procesos y contra incendio para que este a su vez alimente a toda la red de agua de procesos de la planta de filtración y los tanques de recepción; a sí mismo esta misma agua antes de llegar al tanque de agua de procesos y contra incendio suministra agua hacia la planta de preparación de reactivos de la Planta de tratamiento de Efluentes.

El agua de proceso como su nombre lo indica será usada solamente para los Procesos Industriales mas no para el uso de aseo personal ya que aún tiene el pH

sobre 9; como se explico anteriormente la neutralización del agua vendrá en la siguiente etapa.

El Operador de la planta de efluentes continuamente monitoreara el nivel del tanque de agua de procesos y contra incendio especialmente cuando estamos recepcionando concentrado del Mineroducto, es de vital importancia mantener con un nivel adecuado este tanque; así mismo continuamente tendrá la labor de evitar el consumir demasiada agua de procesos ya que los costos de tratamiento se elevaran al tener gran volumen de agua recirculando por esta Planta.

2.2.6.4 SISTEMA DE IRRIGACION DE LA FORESTACION EN PUNTA LOBITOS.-

La Forestación se efectúa con la finalidad de disipar el agua o efluente tratado del Puerto Punta Lobitos mediante evaporación puesto que se usan aspersores para el riego y transpiración a través de las hojas de la Planta. El agua tratada es enviada hacia la Poza de Irrigación a un caudal promedio de 140,000 m³ por mes, que significa 190 m³/h. En la Poza de Irrigación tenemos capacidad de almacenar hasta 30,000 m³ de agua tratada; pero normalmente nuestros procedimientos de operación nos indican que debemos mantener almacenados continuamente aproximadamente 25,000 m³ de agua tratada en esta Poza para cubrirnos de cualquier emergencia de falta de agua por problemas del Mineroducto.

Desde esta poza es alimentada por gravedad hacia la Forestación a través de dos líneas troncales, la altura donde se encuentra la Poza nos brinda una cabeza estática de 74 metros.

El diseño del sistema de riego está diseñado para evacuar hasta un caudal promedio de 96 litros por segundo usando las dos zonas de riego A y B que es alimentado por cada troncal; por lo que está asegurado la evacuación esperada de nuestra compañía de alrededor de 70 litros/segundo.

Pero como medida de seguridad se ha considerado que cada una de las zonas posea líneas principales separadas e independientes, cada una con su propia estación de filtros de discos en la cual en cada Zona podría evacuarse hasta 96 litros por segundo; por lo que el sistema es capaz de aplicar en forma de riego hasta 192 litros por segundo bajo condiciones críticas.

Tal como se menciona anteriormente el agua es filtrada en una batería de filtros de discos para evitar que los aspersores sean incrustados por los sólidos que puedan incidir sobre la superficie abierta de la Poza de Irrigación; además se cuenta con un sistema para inyectar a cualquiera de las dos líneas troncales fertilizantes y aditivos químicos que comúnmente se utiliza en la agricultura.

Las dos líneas principales son de material HDPE 10", además cuenta con válvulas desaeradoras como elemento de seguridad en puntos estratégicos elevados. El sistema de riego comprende de líneas de distribución de 6", luego líneas laterales

de 20 mm de diámetro al cual es insertado el aspersor de 50 litros por hora de flujo auto compensado con un espaciamiento de 3 x 6 metros.

El riego será programado desde una caseta de "Control y Automatización" el cual podrá programar el riego de los diferentes sectores, llevara un control del volumen de agua utilizada con ayuda de contadores de flujo instalado en las tróncales y líneas de distribución, cantidad de fertilizante o agente químico utilizado, perdidas de presión en la línea y saturación de los filtros de discos. En la sala de filtros está localizado este centro de control el cual tiene energía continua y energía de respaldo en caso de apagones continuos hasta por 48 horas.

Los trabajos que se realizaron durante el inicio de la Forestación fueron el Subsulado que se realiza con el ripper de un bulldozer D-8 enterrado 80 - 90 cm en líneas paralelas dispuestas en la orientación de la Plantación cada 3 metros. El resultado es una grieta profunda asociado con la facturación de los estratos inferiores del suelo.

Luego se aplico el rastreaje agrícola tradicional, con rastras de discos tirada por tractor agrícola, se aplica entre hileras de subsulado, para roturar el suelo y prepararlo para la siembra de los árboles posteriores. El subsulado y el rastreaje se realizaron con anterioridad a la instalación del sistema de riego.

Después de la instalación del sistema de riego el suelo fue sometido al lavado de sales solubles con el objetivo de reducir la conductividad eléctrica a valores cercanos a 8 mmhos/cm.

La plantación cuenta con vías de acceso y recorrido de la forestación para la inspección del sistema de riego, de 4 m de ancho en el cual puede transitar todo tipo de vehículos además de la maquinaria agrícola.

Debido al viento intenso en la zona por la cercanía del mar y la posición geográfica en fondo de valle es que se han instalado Cortinas cortaviento de 2 metros de altura y espaciados cada 80 metros y en dirección perpendicular a la dirección de los vientos predominantes, del tipo Raschel polietileno de 50% de densidad.

Finalmente las especies sembradas en el área de Forestación de 174 hectáreas son:

Cuadro N° 2.1 LISTA DE ESPECIES ARBOREAS A UTILIZADOS EN EL PROYECTO DE FORESTACION.

NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO
Eucalipto	Eucaliptos globulus
Eucalipto	Eucalyptus camaldulensis
Acacia salina (Aromo)	Acacia saligna
Acacia	Acacia longifolia

Ponciano	Delonix regia
Tamarix	Tamarix gallica
Mioporo	Myoporum laetum
Tara *	Caesalpinea spinosa
Huarango *	Acacia macracantha
Algarrobo *	Prosopis pallida
Choloque *	Sapindus saponaria
Pacae *	Inga edulis.
Sapote*	Capparis prisca
Palo verde *	Parkinsonia aculeata
Molle costeno *	Schinus terebenthifolius
Cipres	Cupressus sp.
Casuarina	Casuarina equisetifolia
Ciruelo *	Spondias mombin
Laurel *	Nerium oleander

*Especie nativa Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

2.2.6.5 MANTENIMIENTO DE LA FORESTACION.-

El objetivo es asegurar la función disipadora del sistema de evapotranspiración, compuesto por el sistema de riego y la forestación regada; para esto se debe velar por el correcto y permanente funcionamiento del sistema de riego y por un adecuado estado y desarrollo de los árboles plantados.

Los objetivos específicos del mantenimiento de la Forestación son los siguientes:

Mantener viva una cantidad de plantas iguales a la plantada.

Mantener la mejor condición fitosanitaria posible de los individuos de la plantación.

Mantener un nivel de crecimiento óptimo, congruente con un buen estado fitosanitario y una adecuada y una adecuada disponibilidad de recursos de desarrollo como son: agua, nutrientes, protección del viento, manejo de la arquitectura de copa, etc.

Maximizar la capacidad evapotranspirativa de la forestación.

Permitir un acceso despejado y ordenado al área de forestación de acuerdo al plano de la plantación.

Mantener el mejor aspecto escénico o condición estética posible de la forestación y accesos.

En cuanto a los objetivos específicos de la mantención del sistema de riego son los siguientes:

Asegurar el funcionamiento constante y permanente del sistema de riego.

Regular la cota acumulada en la Poza de irrigación de aproximadamente 25,000 m³.

Periódicamente se mide el estado de crecimiento de las especies a través de parcelas permanentes teniendo en consideración el diámetro del tronco. Arrea de copa y altura del individuo.

2.3 Operaciones en la zona del Tajo Antamina.

Al inicio de las operaciones, Antamina era una laguna contaminada naturalmente con Cobre, por eso se tuvo que evacuar toda el agua para poder iniciar con el proceso de extracción de mineral.

Las principales operaciones que se realizan actualmente en el tajo Antamina son:

- Minado del tajo.
- Excavación del tajo.
- Acarreo de mineral.
- Chancado primario.
- Evacuación de aguas subterráneas y superficiales.

Figura N° 2.42 VISTA PANORÁMICA DE LA LAGUNA ANTAMINA.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

Todas estas operaciones son muy importantes para que la mina pueda sostener la extracción de mineral, pero dependen principalmente de la evacuación eficiente de aguas subterráneas y superficiales, porque si no se logra una correcta evacuación de las aguas la napa freática, esta afloraría y convertiría el tajo Antamina nuevamente en una laguna, es por eso de la importancia de la evacuación o drenaje de las aguas y de la correcta disposición de las aguas de escorrentía para poder cumplir con el programa de minado y cumplir con las políticas de medio ambiente de la compañía.

Depósitos de tipo skarn.-

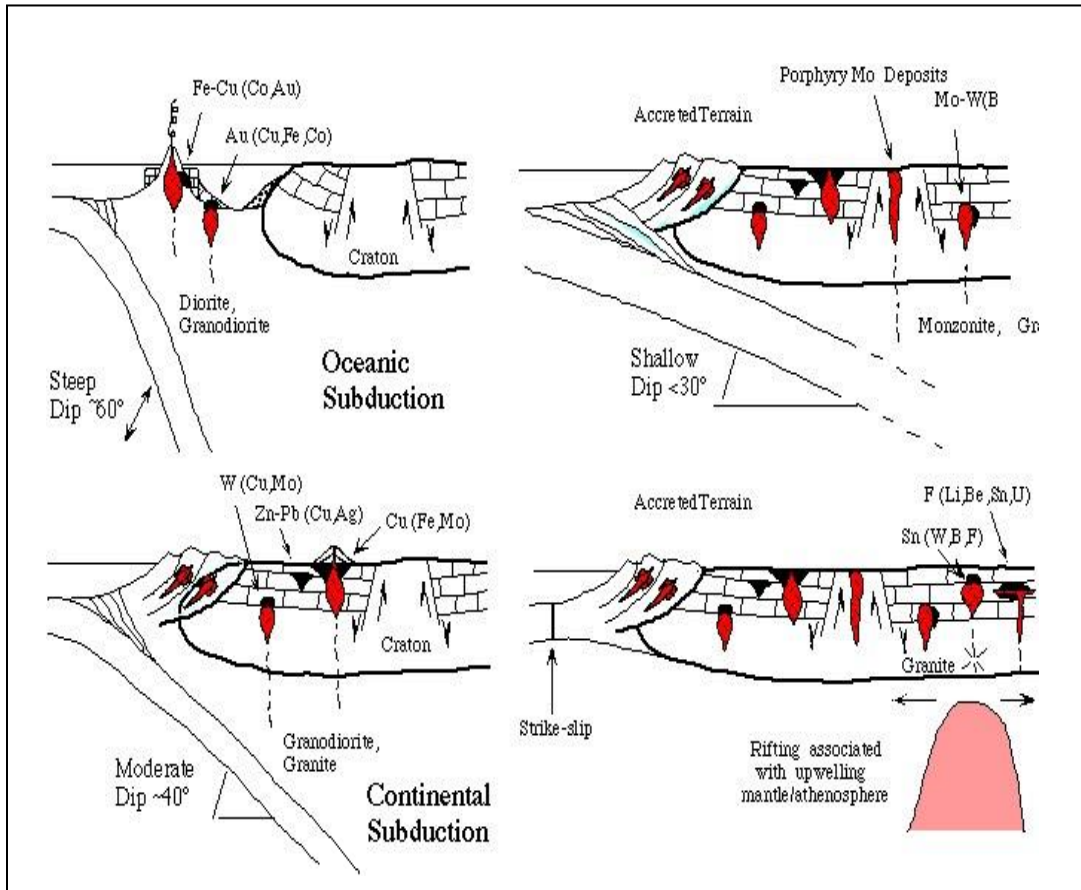
El término skarn fue introducido por petrólogos metamórficos suecos para designar rocas metamórficas regionales o de contacto constituidas por silicatos de Calcio, Magnesio y Hierro derivados de un protolito de calizas y dolomitas en las cuales se ha introducido metasomáticamente grandes cantidades de Silicio, Aluminio, Hierro y Magnesio.

De este modo que se entiende por skarn rocas que contienen minerales calcosilicatados, tales como por ejemplo: diópsido, wollastonita, granate andradita y actinolita. Estas comúnmente ocurren en aureolas metamórficas de contacto en torno a plutones que incluyen secuencias calcáreas.

La producción principal de los depósitos del tipo skarn incluyen: Hierro, Cobre, Carbón, Zinc, Plomo, Molibdeno, Estaño, Oro, granate, talco y wollastonita.

Antamina es uno de los depósitos de mineral tipo skarn más grandes del mundo, es por eso de la complejidad de sus operaciones, ya que este tipo de mena es polimetálica, es decir, que no solo contiene un solo tipo de mineral sino todo lo contrario al extraer Cobre, por ejemplo, también se extrae Molibdeno o Bismuto.

Figura N° 2.43 YACIMIENTO TIPO SKARN.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora.

2.4 Disposición de aguas en el tajo Antamina.-

El sistema de manejo de las aguas superficiales en quebrada Antamina cuyas siglas en ingles es SWMS está conformado por diversas estructuras e instalaciones para el tratamiento y control de la calidad de las aguas que se entregan a quebrada Antamina luego de que estas han discurrido por el área de operaciones del tajo de la mina y el botadero de desmonte adyacente al tajo.

El plan de manejo del SWMS abarca las aguas superficiales que discurren en el tajo, aguas subterráneas extraídas mediante pozos que deprimen la napa freática, la escorrentía superficial y aguas infiltradas del botadero de desmonte, escorrentía sobre pilas de mineral, aguas de escorrentía provenientes de la chancadora primaria y sistema colector de polvos, escorrentía de los caminos de acceso dentro del área de operaciones de Quebrada Antamina, y aportes de quebrada adyacentes.

Los objetivos del SWMS son:

- Separar las escorrentías de las áreas disturbadas de las no disturbadas.
- Minimizar el volumen de agua que requiera tratamiento.
- Reducir el contacto entre la escorrentía y el mineral con potencial de generación ácida o roca de desmonte.
- Emplear sistemas de conducción por gravedad donde sea factible a fin de minimizar los volúmenes y estaciones de bombeo.
- Proveer flexibilidad mediante sistemas redundantes de conducción que permitan dirigir el agua para su tratamiento, descarga o hacia el depósito de relaves en respuesta a cambios en la calidad del agua.

Como se puede observar el SWMS se encarga de mantener constante el retiro de agua de la mina y de la correcta disposición de agua derivándola si está limpia o tratándola y almacenándola si esta no está adecuada para ser utilizada.

2.4.1 Descripción de los principales componentes que comprende SWMS.-

- **Pozos.-**

Los pozos se encuentran distribuidos en el tajo abierto, cuya función es deprimir el nivel freático del subsuelo, para esto se utilizan primero perforadoras para alcanzar el nivel freático, luego se coloca una bomba con impulsores en etapas accionadas por un motor, este desaguado se direcciona por medio de tuberías de Polipropileno de alta densidad conocidas como tuberías de HDPE, por lo general se utilizan tuberías de 12 pulgadas de diámetro.

- **Pozas.-**

Las pozas se encuentran ubicadas en lugares estratégicos dentro del tajo, cuya función es almacenar el agua que proviene de las bombas de los pozos profundos, también se utilizan para sedimentar o para dar tiempo de retención cuando se utiliza floculante cuando se direccionan las escorrentías, estas pozas están cubiertas con una lámina plastificada de geomembrana para evitar que el agua se filtre por el suelo y luego aflore aguas abajo.

- **Canales y tuberías.-**

El sistema de canales y tuberías para el desaguado de la mina se encarga de direccionar las aguas a las pozas y de los posos, según sea su contenido, a tratamiento o al punto de cumplimiento.

El canal más importante es el canal de aguas superficiales, donde descargan las aguas limpias de bajo contenido de metales y de turbidez, este canal descarga directamente al punto de cumplimiento medio ambiental de la quebrada Antamina.

Figura N° 2.44 Pozos de extracción de agua.



Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión de Quebrada Antamina.

2.4.2 Descripción del sistema de colección de agua del tajo Antamina.-

El SWMS se concibe de manera tal que permita a Antamina consistentemente alcanzar el criterio medio ambiental para descarga de los efluentes producidos dentro de su propiedad hacia la Quebrada Antamina.

Históricamente, los principales requisitos de cumplimiento en Quebrada Antamina han sido tratar la carga o concentración de sedimentos en época de lluvias provenientes de carreteras y labores de minado por remoción de la capa superficial y tratar el contenido total de metales asociados con la lixiviación de las pilas de mineral de baja ley dispuestos en la zona sur de Quebrada Antamina, con especial énfasis en Cobre, Zinc, Fierro y Molibdeno.

Estos contenidos pueden variar su concentración de acuerdo a la precipitación registrada en el SWMS. Medio Ambiente mantiene registros diarios de la estación meteorológica de Quebrada Antamina y en función de esos datos se han estimado caudales pico para determinados periodos hidrológicos.

El SWMS de Quebrada Antamina se ha designado el periodo de retorno de 2 años en 24 horas como criterio operativo, de 10 años como criterio de almacenamiento máximo y de 100 años como criterio de descarga máxima.

Antamina para poder tratar el agua tiene un sistema de tratamiento para deprimir Cobre, Zinc y Fierro, que consiste en un conjunto de pozas donde se le agrega

Hidróxido de Sodio para alcanzar un pH adecuado y luego se le adiciona floculante para que las partículas no solubles sedimenten en estas pozas.

Para elementos que sean solubles o que no se puedan tratar, Antamina tiene un sistema de evacuación de agua hacia la poza de relaves, este sistema se le llama Pump Back consta de varias estaciones de rebombeo.

- Canal de aguas superficiales.
- Pozas de tratamiento.
- Sistema de rebombeo.

Canal de aguas limpias.-

El canal de aguas limpias inicia con su recorrido en la zona de descarga de la quebrada Usupallares donde se verifica la calidad de las aguas de esta quebrada para definir si requieren tratamiento dentro del SWMS. En su recorrido el canal tiene la posibilidad de recibir las aguas derivadas de las pozas de transferencia y otros cajones.

El canal de aguas superficiales cuenta con una compuerta en donde si la calidad del agua cumple con los criterios de calidad, entonces la compuerta puede ser abierta y se deja pasar el agua hacia el tramo entubado del canal de aguas superficiales. Caso contrario la compuerta es cerrada y el agua es derivada hacia las pozas de tratamiento en la parte inferior del SWMS.

Si las aguas de este canal cumplen con los requisitos de calidad exigidos serán descargadas en el punto de cumplimiento CO24 mediante la línea de conducción donde se mezclan con las aguas que han recibido tratamiento en las pozas 3937 y 3908 del SWMS.

En caso las aguas no cumplan con los criterios de calidad; estas pueden ser derivadas hacia las pozas de tratamiento 3937 y 3908 de la parte inferior del SWMS.

Figura N° 2.45 FINAL DEL CANAL DE AGUAS SUPERFICIALES.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión de Quebrada

Antamina.

2.4.3 Sistema de tratamiento.-

Poza 3937

La principal poza de tratamiento y sedimentación a ella llegan aguas del drenaje de las pilas de desmonte de baja ley y aquellas aguas tratadas en la parte superior del SWMS que no cumplan con el criterio de calidad de aguas.

Esta poza provee tiempo de retención de 1 hora como mínimo y que luego de ser tratadas son descargadas hacia la poza 3908 mediante la tubería de descarga a la cual esta conectada una válvula.

El tratamiento de las aguas en esta poza se realiza mediante la adición de hidróxido de Sodio y luego floculante al ingreso de las aguas a la poza. En el punto de descarga existe un punto de monitoreo denominado CO24E donde se verifica que la calidad de las aguas vertidas cumple con los criterios de calidad.

Figura N° 2.46 POZA 3937.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión de Quebrada Antamina.

Poza 3908.-

Poza final del sistema de tratamiento la cual recibe las aguas tratadas de la poza 3937; las aguas que recibe y luego son vertidas hacia el punto de cumplimiento CO24 mediante 2 tuberías con válvulas cada una. En el punto de descarga existe un punto de monitoreo denominado CO24F donde se verifica que la calidad de las aguas vertidas cumplan con los criterios de calidad.

Figura N° 2.47 POZA 3908.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión de Quebrada Antamina.

Sistema de rebombeo.-

Este sistema de rebombeo es capaz de operar completamente en modo manual y/o automático. Las estaciones de bombeo que comprende el sistema de rebombeo son controladas en forma secuencial vía PLC y sala de control de concentradora.

Las botoneras de arranque y parada controlan el funcionamiento de las bombas de cada estación de bombeo, basado en secuencias específicas de eventos.

El sistema de rebombeo incluye las siguientes etapas importantes:

- Estación de bombeo N°1.
- Estación booster.
- Estación de bombeo N° 2.
- Poza de transferencia y bombas de evacuación.

Figura N° 2.48 VISTA DE LA BOMBAS DEL SISTEMA DE REBOMBEO



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión de Quebrada Antamina.

Cuando la calidad de agua en la poza 3937 no cumpla con el criterio de calidad indicado, entonces el agua será transferida hacia la estación de bombeo N°1 de donde se bombeará hacia la estación booster y de esta estación hacia la estación N°2 y de ésta hacia la poza de transferencia 01.

Figura N° 2.49 SISTEMA DE TRATAMIENTO.



Fuente: Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión de Quebrada Antamina.

2.5 Presencia del Molibdeno en aguas de pozo profundo.-

Al inicio de las operaciones la compañía minera Antamina diseñó un sistema para tratamiento de Cobre, Hierro, Zinc basándose en sus propiedades de solubilidad comportamiento que adquieren frente a un pH adecuado, es así que solo se le agrega floculante para precipitar estos metales.

Los estudios geológicos determinaron que a medida que siga la profundización del tajo Antamina se encontrarían con mineral rico en molibdeno, motivo por el cual el agua en la capa freática que esta en contacto con este mineral también podría adquirir este metal.

Al inicio del año 2008 se encontró que en las descargas de agua de los pozos profundos del margen izquierdo del tajo elevaron considerablemente su contenido de Molibdeno, motivo por el cual se tuvieron que re-direccionar las tuberías de descarga de estos pozos hacia la poza de relaves.

Como Antamina no tiene un sistema de tratamiento para este metal toda el agua es dirigida hacia la poza de relaves, esto trae como consecuencia que se elevara el nivel de la poza de relaves y que se bajara el flujo de agua limpia.

Es por ese motivo que la compañía tomo la decisión de crear un sistema para deprimir y poder tratar el Molibdeno.

La compañía minera Antamina contrato los servicios de la empresa Canadian Enviromental & Metallurgical Inc. (CEMI) para realizar los estudios necesarios para poder tratar el Molibdeno.

CEMI realizo análisis y luego una prueba piloto para diseñar y dimensionar los equipos necesarios para poder construir la planta de tratamiento de Molibdeno, pero al final el costo de esta planta que requería de tanques mezcladores, reactores,

espesadores y sistemas de bombas era demasiado caro para tratar el flujo contaminado de molibdeno.

Por este motivo se pidieron que se realizaran pruebas para tratar el molibdeno con Cloruro Férrico y con Sulfato Férrico para poder desarrollar un sistema de tratamiento de Molibdeno en el área del tajo.

Figura N° 2.50 **ESPESADOR DE LA PLANTA PILOTO.**



Fuente: elaboración propia.

2.5.1 Comportamiento del Molibdeno.-

Para poder realizar las pruebas para la precipitación del molibdeno se recurrió a la experimentación con el sulfato férrico para precipitar el molibdeno como floculo de $Fe_2 O_3 \cdot (MoO_4)$; Pero esta floculo solo se conseguiría si se le da el ph adecuado entonces se decidió aprovechar la capacidad acidificadora del sulfato férrico para darle el medio adecuado de Ph a la reacción, con este método ya no se tendría la necesidad de gastar en reactivos para darle el medio a la reacción.

2.6 Molibdeno como agente contaminante en seres humanos.-

Más allá de la clasificación del molibdeno como elemento de rastro esencial, son datos limitados disponibles para determinar dosis-respuesta o las relaciones dosis-efecto en poblaciones humanas. Todavía no se sabe si el molibdeno de fuentes de alimento es absorbido más fácilmente que el molibdeno de fuentes de agua potable.

Trabajos de pruebas adicionales será requerido para determinarse qué formas de molibdeno son las más bioviables y cómo los metales de rastro, las proteínas, y otros componentes de la dieta afectan la absorción del molibdeno.

El camino primario de la exposición al molibdeno es por la ingestión de las plantas y de los animales que contienen el molibdeno en sus tejidos finos o la consumición de la especie disuelta con agua del molibdeno. Una vez dentro del cuerpo humano, los niveles del molibdeno son regulados por la eficacia de la absorción, levantando

el tejido fino, y la salida urinaria. Estas funciones pueden adaptarse a un exceso o a una deficiencia del molibdeno en el cuerpo, aumentando salida urinaria para eliminar el molibdeno cuando se ha tomado en exceso, aumentando la eficacia de la absorción y levantan el tejido fino cuando se han tomado las cantidades escasas.

No hay bioconcentración del molibdeno en seres humanos o animales terrestres. Aunque el molibdeno se almacena en el tejido fino, con los niveles más altos ocurren daños en los riñones, el hígado y los huesos, se elimina rápidamente del cuerpo vía la orina. En pruebas de laboratorio, para casos de seres humanos contaminados con dosis orales de molibdeno, estos eliminaron entre 17-80% de la dosis dentro de horas o de días en la orina. El resto fue eliminado en las heces.

Un camino secundario de la exposición al molibdeno es vía la inhalación. La exposición atmosférica al molibdeno puede ocurrir en las industrias metalúrgicas donde se calientan los aceros y otras aleaciones, corte y tierra, generando los humos del molibdeno y de partículas metálicas, que entonces llegan a ser aerotransportados.

Un camino adicional de la exposición al molibdeno está en el útero; las comparaciones de las concentraciones del molibdeno en la sangre del cordón de recién nacidos y del plasma de sangre de madres indicaron que el molibdeno podría cruzar fácilmente la barrera placentaria. Pues solamente las cantidades pequeñas de molibdeno cruzan la barrera placentaria, en el útero la exposición

sería solamente una preocupación en caso de se halla afligido a la madre con el envenenamiento del molibdeno.

En adultos los síntomas de la deficiencia del molibdeno incluyen lo siguiente:

- Irritabilidad
- Mientras que la mayoría de la gente no demuestra síntomas, alguna exhibe inhabilidades de aprender, el retraso mental, y otros problemas neurológicos.
- Pueden también demostrar lentitud y la debilidad de los músculos.
- Problemas del hígado y su respiración, sudor y orina puede tienen el olor de la col hervida.

Además de los síntomas ya mencionados, el predominio del cáncer del esófago en África meridional se ha ligado a la consumición de los alimentos producidos en los suelos deficientes del molibdeno.

El exceso del molibdeno se puede también asociar a efectos de salud adversos, fueron observados síntomas en una población de armenia que vivía en un área con altas concentraciones del molibdeno en el suelo. El Gout es caracterizado por la acumulación de exceso del ácido úrico, que forma los cristales que se depositan en los riñones, el cartílago común, los tendones, y los tejidos finos circundantes. Los depósitos del cristal en los riñones forman eventual las piedras, que pueden causar

dolor atroz, mientras que los depósitos en los empalmes y los tendones conducen al dolor y a la tiesura.

Los síntomas del envenenamiento del molibdeno:

Algunos de los cuales son iguales que los síntomas de la deficiencia del molibdeno, incluyen:

- Irritabilidad.
- Dolores de cabeza.
- Fatiga.
- Falta del apetito.
- Vértigos.
- Dolor muscular.
- Niveles de cobre bajos.
- Altos niveles del ácido úrico en la sangre.
- Edema del tejido fino (acumulación del líquido, generalmente en las piernas)
- Color rojo en las manos, las rodillas, y los pies.
- Temblores.
- Sudoración de las manos y piel.

Hay información limitada disponible en los tratamientos para el envenenamiento del molibdeno en seres humanos. En caso de que el envenenamiento agudo haya ocurrido vía la ingestión, el tratamiento implica la descontaminación de los intestinos vía la irrigación gástrica, vomitando, o el carbón de leña activado, no obstante no hay datos para apoyar la eficacia de estas medidas.

III. EQUIPOS MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Equipos.

Para realizar la investigación experimental se usó el equipo de jarras (Floculador-sedimentador) provisto de cuatro recipientes cilíndricos verticales de vidrio pirex graduado de un litro de capacidad y su sistema de agitación, y equipado con los siguientes accesorios originales principales: Impulsores de agitación de paleta accionados por un motor eléctrico de velocidad variable con su respectivo panel de control que permite medir la velocidad de mezclamiento respectivo.

Figura N° 3.1 REPRESENTACIÓN DETALLADA DEL EQUIPO DE JARRAS
(FLOCULADOR-SEDIMENTADOR)



Fuente: Elaboración propia.

Una representación detallada del equipo de jarras (Floculador- sedimentador, Fabricante: Phipps & Bird) se muestra en la figura 3.1.

Asimismo se utilizaron los siguientes equipos

- Equipo multiparamétrico.
- Equipo de protección personal.
- Equipo de filtración al vacío.
- Equipo de microscopia.
- Equipo de Absorción atómica.

Los instrumentos de medición utilizados en la experimentación son:

- Balanza
- Densímetro
- Cronómetro
- Termómetro
- Tubidímetro

3.2 Materiales.

3.2.1. Reactivos.

- Sulfato Férrico al 2.6% V/V.

- Magnafloc E34 al 0.0375% V/V.

3.2.2. Materiales de laboratorio.

- Vasos de precipitado.
- Matraces de Erlenmeyer
- Bagueta.
- Jeringas de 5ml.
- Bureta
- Pipeta
- Papeles indicadores
- Guantes de latex.

3.3 Método.

En la presente tesis, se ha utilizado el método experimental, y observacional.

3.3.1 Método Experimental. Diseño Experimental.

3.3.1.1. Bases de diseño.

Se ha estudiado experimentalmente las condiciones de operación para la remoción de molibdeno de las aguas de pozo profundo del tajo de Antamina.

Las variables cuantitativas de importancia obtenidas fueron: Cantidad de sulfato

férrico, la cantidad de magnafloc, velocidad de coagulación, velocidad de floculación, tiempo de coagulación, tiempo de floculación, velocidad de sedimentación.

Los experimentos se realizaron a nivel de laboratorio para determinar los efectos de las variables mencionadas sobre la condiciones de operación para la remoción de molibdeno de las aguas de pozo profundo del tajo de Antamina, y la performance de los equipos e instrumento de medición utilizado en la experimentación.

El tamaño de la muestra problema para la experimentación se ha elaborado muestreando un volumen de 20 litros de agua de la tubería de descarga del pozo TW-12 del tajo Antamina, el cual al ser analizado en el laboratorio nos proporciona el contenido de molibdeno, fierro, y sus características correspondientes en la muestra problema, el cual detalla en la siguiente tabla 3.1

En, base al problema planteado y según el modelo experimental convencional usado se han efectuado 8 corridas experimentales para la evaluación de las variables mencionadas.

Asimismo, cabe mencionar que el proceso de coagulación y, por consiguiente, la floculación son extremadamente sensibles a las características fisicoquímicas del agua, tales como la alcalinidad, el pH, y la turbiedad, los cuales son demostrados al adicionar el sulfato férrico como coagulantes que influye en la remoción del

molibdeno en función del pH, la concentración del coagulante (2,35 v/v %), la velocidad de agitación y el tiempo de formación de floculos, por consiguiente el tiempo de floculación, cantidad y concentración del magnofloc (0,0375 v/v%), velocidad de agitación, y velocidad de sedimentación.

Tabla N° 3.1 CONTENIDO DE MOLIBDENO Y HIERRO EN EL AGUA DEL POZO TW-12 DEL TAJO DE ANTAMINA (MUESTRA PROBLEMA)

CONTENIDO	CANTIDAD
Molibdeno	0,35 mg/L
Hierro	0,02 mg/L
Cobre	0,01 mg/L
Zinc	0,02mg/L
pH	7,82
Turbidez	4.37 NTU
Temperatura	10,3 °C
Conductividad	436 μ S/cm

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2 Pruebas previas y puesta a punto del Floculador sedimentador.

Siguiendo la técnica planificada, en primer lugar se hicieron pruebas del poder precipitante del molibdeno utilizando el sulfato férrico sobre el agua de los pozos profundos del tajo de Antamina, sobre este molibdeno precipitado se procedió a tratar de disolverlo con el agua del canal de aguas superficiales, puesto que este canal será el receptor del agua al final del tratamiento de remoción del molibdeno, observándose que el molibdeno precipitado es estable y no se re disuelve.

En segundo lugar se hicieron cinco corridas previas utilizando agua proveniente del canal de aguas limpias. Con estas corridas se pretendió adquirir la habilidad en el manejo del equipo y ajustar el equipo a las condiciones adecuadas. En ninguna de las corridas se obtuvieron resultados debido a que o se llegó a concluir la coagulación y la floculación respectiva por diversas causas como, errores operativos, interrupción no deseada de la velocidad de agitación y los tiempos de coagulación y floculación.

En tercer lugar, utilizando reactivos (sulfato férrico, magnafloc) de menores concentraciones, se realizaron cinco siguientes corridas para establecer las condiciones en las cuales se han llevado a cabo las experimentaciones. Estas corridas se llevaron bajo distintas condiciones de velocidad de agitación para la coagulación y floculación correspondiente, llegándose a calibrar el registrador de la velocidad de agitación y sistema de operación verificándose el funcionamiento del equipo de jarras, el motor, los impulsores de aspa.

3.3.1.3. Procedimiento Experimental.

El siguiente procedimiento experimental fue utilizado:

a. Preparación del tamaño de muestra.

Se tomó una muestra de 20 litros de agua de la tubería de descarga del pozo TW-12, se escogió este pozo porque en el análisis de calidad de agua, este pozo reportó el mayor contenido de ppm de Molibdeno, adicionalmente se tomo una muestra de 1 litro del final del Canal de aguas superficiales, para realizar una prueba de redisolución del Molibdeno.

b. Homogenizado de la muestra.

La muestra que se tomo del canal de aguas superficiales se llevó al laboratorio para el análisis de metales disueltos de Cobre, Fierro, Zinc y Molibdeno.

Se procedió a homogenizar la muestra del pozo TW-12, agitando manualmente, utilizando una bagueta, durante 2 minutos y seguidamente se midió el pH con el propósito de tener una referencia para las operaciones siguientes.

Después de homogenizar la muestra se procedió a distribuirla de la siguiente manera: 1 Litro se llevó a laboratorio para análisis de blanco y los restantes para las corridas planeadas, utilizándose 20 litros de la muestra del pozo TW-12.

c. Análisis de blanco:

La muestra para el análisis de blanco se llevó al laboratorio para determinar el

contenido de Molibdeno, Cobre, Hierro y Zinc, ver tabla 3.1.

d. Tratamiento químico.

Se preparó Sulfato Férrico con una concentración de 2.35% V/V y floculante Magnafloc E34 con una concentración de 0.037%.

El Sulfato Férrico serviría para lograr el pH adecuado de trabajo y como agente coagulante del Molibdeno.

Se tomaron los 4 litros para cada corrida y se llenaron 4 vasos de precipitación hasta 900 ml cada uno y se colocaron en el equipo de jarras.

Figura N° 3.2 REPRESENTACIÓN DETALLADA DE UNA DE LAS CORRIDAS

EXPERIMENTALES



Fuente: elaboración propia.

e. Agitación de la muestra.

Se encendió el equipo de jarras y se empezó a agitar la muestra con una velocidad inicial de 100 rpm durante 1 minuto, adicionando sulfato férrico hasta lograr el pH de trabajo, concluida la adición de Sulfato Férrico en las 4 jarras se agregó a continuación el floculante, terminada la adición de floculante se redujo la velocidad del equipo a 30 rpm agitándose por espacio de 15 minutos (ver figura 3.3).

f. Sedimentación.

Terminada la agitación lenta se apagó el equipo y se retiraron los agitadores de los vasos para dejar el sistema en reposo utilizando los tiempos de sedimentación, de 0, 1, 3, 5, 7 y 10 minutos, se tomaran las alturas de las interfaces de sedimentación, (ver figura 3.3)

g. Filtrado de la solución precipitada.

Terminada la sedimentación se procedió a retirar los vasos del equipo de jarra y se filtro el volumen del contenido en las jarras utilizando el equipo de filtro al vacío. (ver figura 3.4)

Figura N° 3.3 REPRESENTACIÓN DETALLADA DE LA SEDIMENTACIÓN.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 3.4 REPRESENTACIÓN DETALLADA DE LA FILTRACIÓN.



Fuente: Elaboración propia.

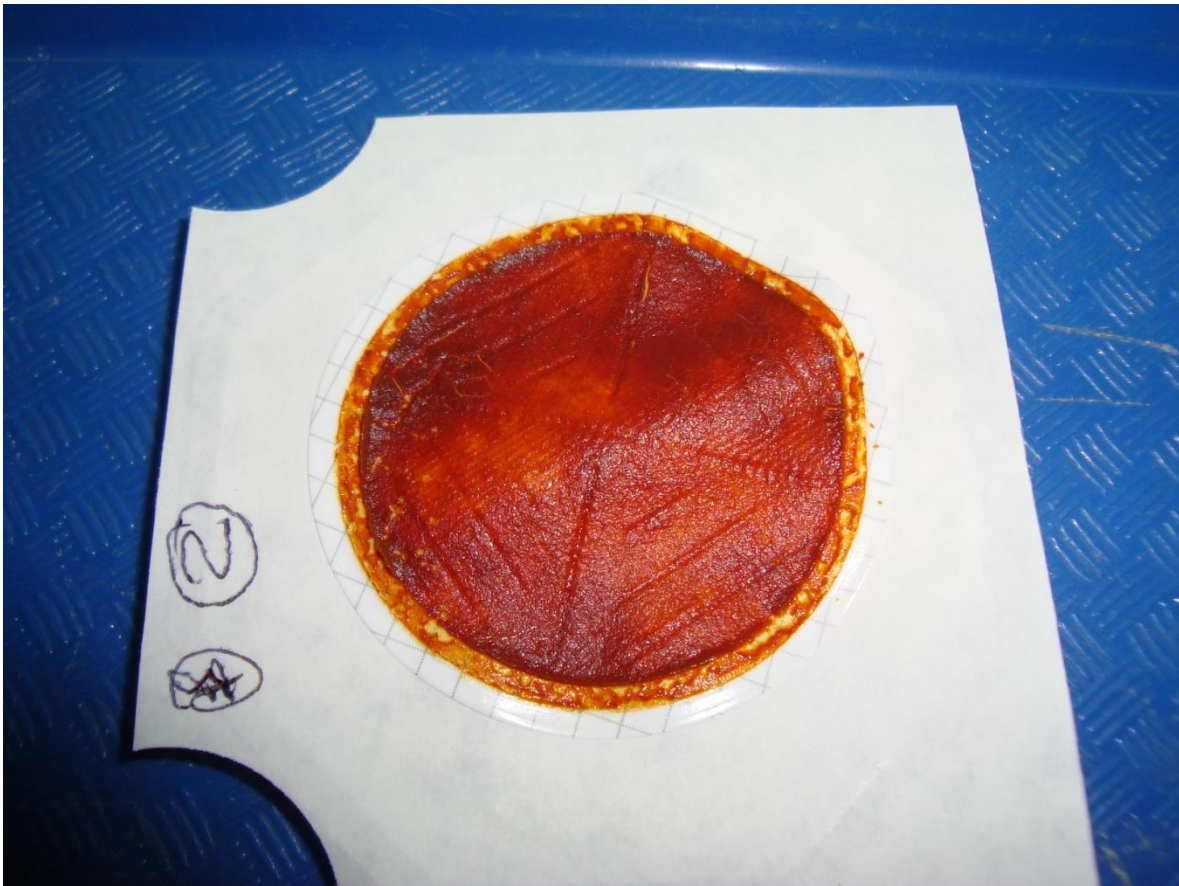
h. Solución filtrada.

La solución filtrada obtenida se utilizó para su análisis de metales disueltos, con el propósito de determinar el contenido de Molibdeno, Zinc, Cobre y Fierro en la solución.

i) Material sólido del filtrado.

Se procedió a pesar el material sólido filtrado en las membranas de filtro, previamente secado en la mufla, ver figura 3.5

Figura N° 3.5 SÓLIDO FILTRADO Y RETENIDO POR LA MEMBRANA DE FILTRACIÓN



Fuente. Elaboración propia.

Luego se pesaron las membranas y se obtuvo la cantidad de lodo recuperado,

como indica la tabla 3.2.

Seguidamente se distribuyeron los lodos atrapados en las 8 membranas de la siguiente manera: Las primeras 4 membranas recibirían un tratamiento adicional de redisolución de lodos, para ello se prepararon 4 vasos de 250 ml con agua procedente del Canal de Aguas Superficiales y se dejaron reposar las 4 membranas por un espacio de 30 minutos y 1 minuto de agitación lenta.

Después de pasado el tiempo de redisolución se procederá a retirar con sumo cuidado cada una de las membranas para después llevarlas a secar a una mufla. La solución contenida en los vasos se procederán a filtrar, el filtrado se enviará a análisis espectrofotométrico para metales disueltos, de fierro, molibdeno y zinc, y el posible lodo atrapado en la membrana se enviará a descarte.

Las 4 membranas restantes se usaron para el análisis microscópico, el cual nos sirvió para determinar el tamaño de partícula promedio de lodos precipitables.

IV. RESULTADOS

La evidencia experimental claramente indica que para una eficiente remoción de molibdeno el paso limitante es la coagulación o formación de coagulos o precipitado del sulfato férrico neutralizando sus cargas de molibdeno que se encuentra en la muestra problema y estos datos experimentales obtenidos se muestra en las siguientes tablas de resultados.

Tabla N° 4.1. RESULTADOS DE EFECTOS DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN.

Corrida N°	Consumo de sulfato férrico ml	A 150 RPM pH	A 120 RPM pH	100 RPM pH
1	1,2	6,8	6,5	6,5
2	2,6	6,7	6,0	6,0
3	3,0	6,5	5,5	5,5
4	3,5	6,3	5,0	5,0
5	3,6	6,0	4,5	4,5
6	4,0	6,0	4,0	4,0
7	4,5	6,0	4,0	4,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.2 RESULTADOS DEL EFECTO DEL CONSUMO DE SULFATO FÉRRICO, MAGNAFLOC, PH SOBRE LA REMOCIÓN DEL MOLIBDENO A 100 RPM PARA LA COAGULACIÓN Y DE 30 RPM PARA LA FLOCULACIÓN

Corrida	Consumo de Sulfato Férrico al 2,35%v/v ml	Consumo de magnafloc E34 al 0,0375%v/v ml	pH de trabajo	pH ajustado	Fierro Disuelto mg/L	Molibdeno removido mg/L	% Remoción
1	1,2	2	6,5	6,54	0,46	0,22	37,14%
2	2,6	2	6,0	5,97	0,21	0,02	94,29%
3	3,0	2	5,5	5,56	0,19	0,01	97,14%
4	3,5	2	5,0	4,99	0,25	0,009	97,42%
5	3,0	4	5,5	5,58	0,14	0,01	97,14%
6	3,5	4	5,0	5,06	0,18	0,009	97,42%
7	3,6	4	4,5	4,42	0,23	0,009	97,42%
8	4,0	4	4	3,95	0,4	0,009	97,42%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4.3 TABLA DE RESULTADOS DEL AGUA DEL CANAL DE
AGUAS SUPERFICIALES.**

Contenido	Cantidad
Cobre	0,01mg/L
Fierro	0,01 mg/L
Molibdeno	0,07 mg/L
Zinc	0,18 mg/L

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.4 RESULTADOS DEL LODO SEDIMENTADO Y FILTRADO

Corrida	Peso del papel de filtro (membrana) en gramos	Peso del papel de filtro (membrana) con lodo en gramos	Peso de Lodo recuperado en gramos
1	0,0653	0,0866	0,0213
2	0,0652	0,106	0,0408
3	0,0654	0,1131	0,0477
4	0,0651	0,1226	0,0575
5	0,0731	0,1149	0,0418
6	0,067	0,1208	0,0538
7	0,0722	0,1323	0,0601
8	0,0727	0,1372	0,0645

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.5 RESULTADOS DE LA SEDIMENTACIÓN: ALTURA DE LA INTERFACE DE LA SEDIMENTACIÓN.

Tiempo minutos	0	1	3	5	7	10
Corrida	Altura de la interface de la sedimentación (cm)					
1	11,4	10	5,4	0	0	0
2	11,4	10,3	5		1,6	0
3	11,2	9,9	5,4		2	0
4	11,4	9,8	5,8		2,3	0
5	11,3	10,9	8,6	4,2	0	0
6	11,3	9,8	5,4	3,3	0	0
7	11,3	7,5	2	0	0	0
8	11,2	6,3	2	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.6 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN.

Corrida	Consumo de magnafloc E34 al 0,0375%v/v ml	Consumo de Sulfato Férrico al 2,35%v/v ml	Velocidad de sedimentación promedio cm/min	Lodo producido gr	% remoción de molibdeno
1	2	1,2	1,65	0,0213	37,14
2	2	2,6	1,43	0,0408	94,29
3	2	3,0	1,33	0,0477	97,42
4	2	3,5	1,30	0,0575	97,42
5	4	3	1,67	0,0418	97,42
6	4	3,5	1,63	0,0538	97,42
7	4	3,6	1,52	0,0601	97,42
8	4	4,0	1,44	0,0645	97,42

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4.7 RESULTADOS DE METALES DISUELTOS DE LA
SOLUCIÓN FILTRADA.**

Muestra	Metales Disueltos			
	Cu-D (mg/L)	Fe-D (mg/L)	Mo-D (mg/L)	Zn-D (mg/L)
TW-12	0,01	0,02	0,35	0,02
1	0,01	0,16	0,22	0,04
2	0,01	0,21	0,02	0,13
3	<0,01	0,19	0,01	0,06
4	0,01	0,25	0,009	0,08
5	<0,01	0,14	0,01	0,04
6	0,01	0,18	0,009	0,03
7	0,01	0,23	0,009	0,03
8	0,02	0,4	0,009	0,04

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.8 RESULTADOS DE LA REDISOLUCIÓN DE LODOS.

Muestra	Metales disueltos			
	Cu-D (mg/L)	Fe-D (mg/L)	Mo-D (mg/L)	Zn-D (mg/L)
*CAL	<0,01	0,01	0,07	0,18
1	<0,01	0,1	0,14	0,19
2	<0,01	0,06	0,14	0,22
3	<0,01	<0,01	0,08	0,21
4	<0,01	<0,01	0,05	0,18

Fuente: Elaboración propia. * CAL: canal de agua limpia

**Tabla N° 4.9 RESULTADOS DE LA REMOCIÓN DEL MOLIBDENO
DISUELTO.**

Corrida	pH	pH ajustado	Solución filtrada de las jarras	Producción de lodos	Redisolución de lodos	Remoción De
			Mo mg/L		Mo mg/L	Molibdeno disuelto %
1	6,5	6,54	0,22	0,0213	0,14	37,14
2	6,0	5,97	0,02	0,0408	0,14	94,29
3	5,5	5,56	0,01	0,0477	0,08	97,14
4	5,0	4,99	0,01	0,0575	0,05	97,42

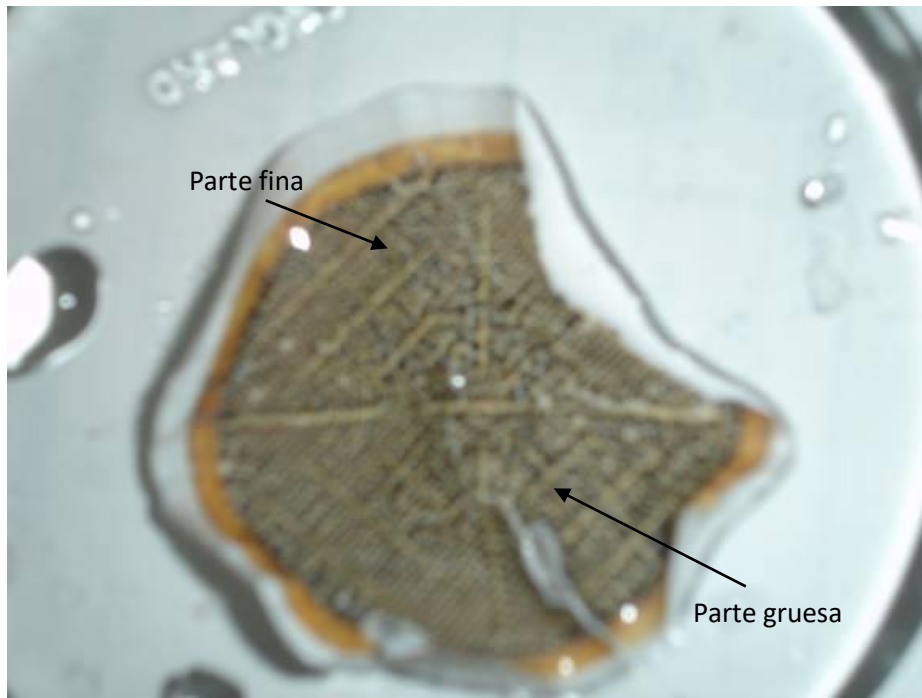
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.10 RESULTADO DEL ANÁLISIS MICROSCÓPICO.

Tamaño	Filtro 1	Filtro 2
Parte gruesa	% V	%V
50-100 micras	4	2
100-200 micras	19	49
200-600 micras	77	49
% volumen Total de P. gruesas	100	100
Parte fina		
5-50 micras	60	80
50-100	40	20
% volumen total de Partículas Finas	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 4.1 FOTO DEL FILTRO NÚMERO 1



Fuente. Elaboración propia.

Figura N° 4.2 FOTOS DEL FILTRO 1 A DIFERENTES MEDIDAS OPTICAS.

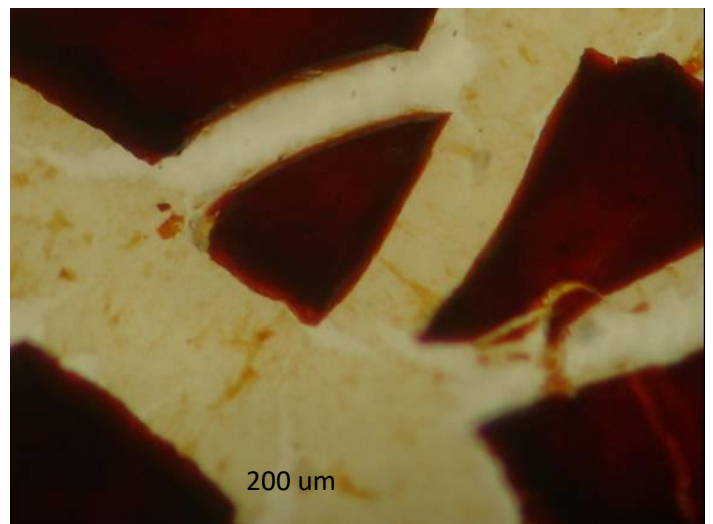
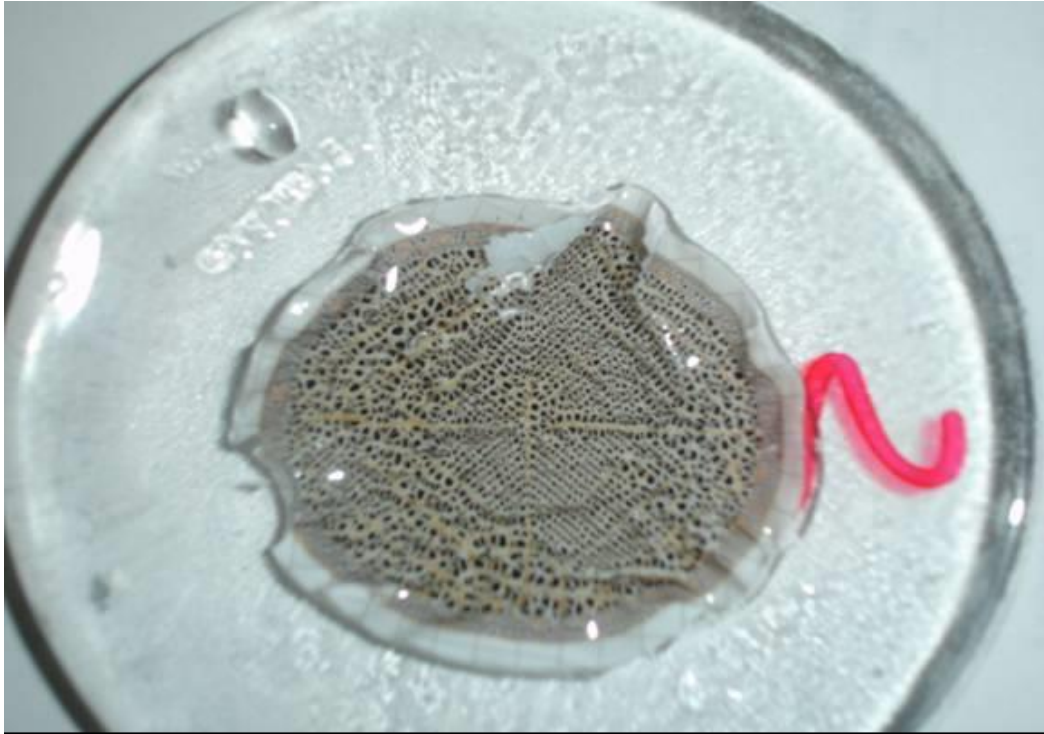
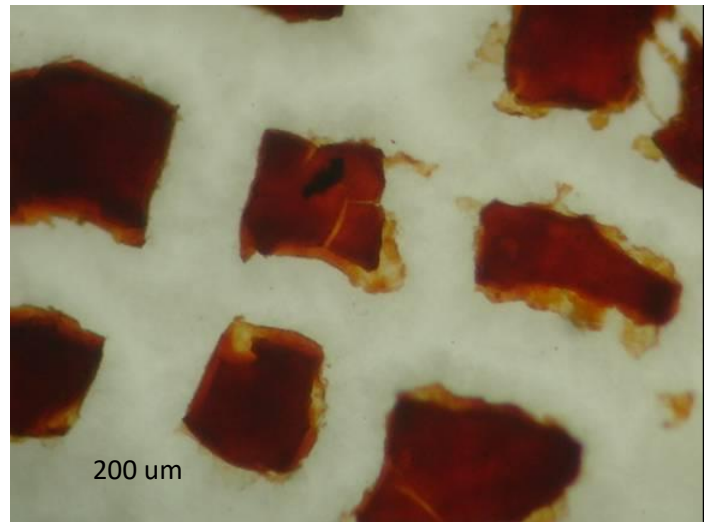


Figura N° 4.3 FOTOS DEL FILTRO NÚMERO 2.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 4.4 FOTO DEL FILTRO 2 A DIFERENTES MEDIDAS OPTICAS



Fuente: Elaboración propia

V. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.-

En este trabajo de tesis al analizar los resultados experimentales se han obtenido los siguientes detalles:

El molibdeno disuelto en las 8 corridas experimentales muestran que el proceso de coagulación tiene mayor rendimiento en pH entre 5,0 a 5,5, esto indica que la velocidad de rendimiento en este rango de pH mencionado el cual muestra que los valores más bajos disueltos de Molibdeno en la muestra problema, puesto que el valor en la muestra del pozo TW-12 tiene un contenido de 0,35 mg/L de molibdeno el cual se reduce hasta 0,009 mg/L.

Asimismo la performance del proceso de coagulación muestra la formación de flocos o los precipitados de copos o porciones de coágulos de molibdeno adherido o adsorbido en el sulfato férrico el cual es aceptable, esto indica que no se presenta el problema de cizallamiento por efectos de los impulsores de paleta y la velocidad de rotación.

Esto nos conlleva que los principales factores que influyen en el proceso de coagulación son:

- Características de las aguas especialmente: pH, temperatura, alcalinidad, contenido de turbidez y color
- Características de los reactivos utilizados, tipo, dosis y concentración de la solución.

- Características de las cantidades de dosificación y el mezclamiento rápido, es decir la intensidad de mezclamiento y tiempo de retención (1min.)
- Se ha observado que el efecto aumenta marcadamente con el numero de cargas del ión coagulante. Así pues para materiales coloidales que se encuentra en el agua del ión $MoO_4^{=4}$ como carga negativa física es atrapado con el fierro trivalente 30 veces mas su periodo de los divalente como el bario y Magnesio.
- Se observado que el pH es el factor crítico de coagulación siempre hay un intervalo de pH en el que el coagulante sulfato férrico trabaja mejor en el rango entre 5 a 5.5 que coincide con el mínimo de la solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado. El cual se demuestra que la coagulación con el sulfato férrico se efectúa dentro de la zona optima ya que de lo contrario se podría desperdiciar los reactivos químicos.
- Con respecto a la agitación. Para que la coagulación sea optima es necesario que la neutralización de los coloides sea total antes de que comience a formarse el flóculo o precipitado. Por lo tanto para alcanzar la neutralización de los coloides se introduce el coagulante, el cual debe de difundirse con la mayor rapidez, esto se logra a una velocidad de agitación de 100 rpm en un corto tiempo de un minuto, el cual se demuestra que el tiempo de coagulación es muy corto de acuerdo a la tabla de resultados N° 4.3.

- Con respecto a la cantidad de coagulantes. Se ha usado el sulfato férrico por ser uno de los coagulantes principales mas utilizados para estos casos, en el rango del pH óptimo de coagulación. Como se demuestra con los resultados experimentales de la tabla N° 4.2. $Fe_2(SO_4)_3$.
- Con respecto a la floculación, se agrego el magnafloc debido a que tiene la propiedad de unir entre los flóculos ya formados con el fin de aumentar su volumen y peso, de forma que pueda decantar. Se ha observado que este proceso consiste en la captación mecánica de las partículas neutralizadas formándose un sólido de mayor volumen, y de ésta manera se consiguió que la partícula aumente hasta un tamaño de $50 \mu m$, aumentando por lo tanto la velocidad de sedimentación de los flóculos, como se puede observar en la tabla 4.5.
- En este proceso de floculación influye la velocidad de agitación que debe ser lenta y homogénea en cual favorece la unión entre los flóculos en forma intensa, para lo cual los estudios realizados para tratamiento de agua se recomienda que la velocidad de agitación es de 30 rpm durante 15 minutos, el cual ratifica de acuerdo a los datos experimentales obtenidos, la velocidad de sedimentación aumenta al adicionar el floculante Magnafloc E34 la a cantidad de 2ml y 4 ml. Estos valores indican que la cantidad mínima y máxima que se debe adicionar el floculante magnafloc para lograr menos tiempo de retención del proceso y mayor producción de lodos. En la tabla

Nº 4.7 que se muestra en la corrida 6 se obtiene el valor alto de una velocidad de sedimentación mayor. Por lo tanto se demuestra que el incremento de la cantidad de magnafloc adicionado no afecta a la cantidad de remoción del molibdeno tal como se muestra en la tabla de resultados 4.2.

- El resultado del análisis del laboratorio del blanco se puede observar que el contenido de Molibdeno es alto 0.35 mg /L. y baja concentración de Cobre, Fierro y Zinc.
- El resultado del análisis del laboratorio del agua del canal de aguas superficiales muestra que esta dentro de los límites máximos permisibles para metales disueltos.
- Se puede observar que en la sedimentación la prueba que obtuvo mejores resultados, en lo que se refiere a velocidad de sedimentación, fue en la corrida número 6 teniendo un valor de 1.63 cm/min.
- En cuanto al lodo obtenido en las 8 corridas experimentales podemos concluir que las pruebas con mayor porcentaje de remoción de molibdeno tuvieron los valores más altos fue de 0.0645 gramos.
- Del análisis de la redisolución de lodos se puede observar que en las corridas 3 y 4 no se presento redisolución de lodos de molibdeno. Lo cual

nos indica que para rangos de pH mayores a 5.5 se puede tener mayor incidencia de redisolución de lodos precipitables.

- Del análisis microscópico de los lodos atrapados en los filtros se puede decir que del filtro 1 se caracteriza por presentar partículas oscuras de mayor tamaño y presentar un borde pardoamarillento mas definido. El filtro 2, presenta partículas más pequeñas y un borde ligeramente pardo. En ambos casos las partículas oscuras presentan bordes lomonitizados/hematizados, sin embargo las partículas finas se encuentran completamente limonizadas y en partes hematizadas.
- El análisis de sedimentación nos dio como resultado que es necesario la adición de floculante, en este caso Magnafloc E34 para tener valores más altos de velocidad de sedimentación y así lograr un menor tiempo de retención en el proceso.
- Si observamos el fierro disuelto para la corrida 8 fue de 0.4 mg/L lo cual es un indicativo de que se uso sulfato férrico en exceso para la remoción del molibdeno disuelto, ya que el valor inicial de fierro disuelto presente en el pozo TW-12 fue de 0.02 mg/L.
- En las pruebas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se obtuvieron remociones mayores al 95% de molibdeno disuelto, siendo su rango de pH de trabajo entre 4 y 5.5.

Para las pruebas 1 y 2 la remoción fue de 37,14% y 94,29% con un pH de trabajo de 6 y 6.5, esto quiere decir que para valores de pH mayores a 5.5 se lograron efectos de disminución en la remoción de molibdeno ya que no se obtiene una eficiente coagulación.

- En las pruebas 2, 4, 7 y 8 se incremento el fierro disuelto, esto se debe a que en estas pruebas se tuvo el mayor gasto de sulfato férrico, cabe destacar que en ninguna de las 8 corridas experimentales no se sobrepaso el límite máximo permisible para este metal que es de 1 mg/L.
- El análisis de la redisolución de lodos se puede observar que en las corridas 3 y 4 no se presento redisolución de lodos de molibdeno. Lo cual nos indica que para rangos de pH mayores a 5.5 se puede tener mayor incidencia de redisolución de lodos precipitables.
- En el análisis microscópico el mayor % de partículas gruesas tiene un rango de tamaño de 200 a 600 micras. Las partículas finas a su vez se encuentran con mayor incidencia en un rango de tamaño de 5 a 50 micras.

VI. CONCLUSIONES

De los resultados experimentales y de su discusión respectiva se concluye que :

- Las condiciones de operación para la remoción del 97.42% de molibdeno de las aguas de pozo profundo del tajo Antamina se muestra en la corrida N° 4 y 6 de la tabla de resultados N° 4.2, donde el pH óptimo para la coagulación del molibdeno disuelto es 5.
- La cantidad optima del consumo de coagulante que se debe utilizar es 3.5 ml de sulfato férrico con una concentración de 2.35% v/v.
- El tiempo de coagulación optima 1 minuto.
- Velocidad de agitación óptima para la coagulación 100 rpm
- La cantidad optima de consumo floculante Magnafloc que se debe adicionar es 4 ml con una concentración de 0.0375% v/v.
- Tiempo de floculación optima 15 minutos.
- Velocidad de agitación óptima para la floculación 30 rpm.
- Velocidad de sedimentación optima 1.63 cm/min.
- Tiempo de sedimentación optima 10 minutos.

La cantidad de hierro disuelto aumenta de 0.02 hasta 0.25 mg/L, pero no son significativos porque están por debajo del límite máximo permisible que es 1 mg/L.

- Se puede observar que la reacción es inmediata entre el molibdeno y el sulfato férrico por la formación de precipitado, como mínimo para esta prueba el tiempo de retención debe ser de 10 minutos.
- El rango de pH óptimo para la coagulación de Molibdeno disuelto utilizando sulfato férrico es entre 4 - 5.5
- Referente a la producción de lodos cabe señalar que estos presentan mayor estabilidad con pHs de coagulación entre 4 y 5.5
- El efecto de redisolución de lodos frente a aguas de pH básico no es significativo para lodos formados a pHs ácidos en un rango de 4 - 5.5
- Para esta prueba velocidad óptima de sedimentación fue de 1.63 cm/min, que se logro en la corrida número 6.
- El tiempo óptimo de sedimentación fue de 10 minutos.
- La cantidad óptima de floculante utilizado debe ser 4 mililitros para esta prueba.

- El hierro disuelto presenta aumentos en cuanto a su contenido pero no son significativos debido a que no se excede el límite máximo permisible de 1 mg/L.
- La eficiencia de la floculación es muy alta debido a que no hay dificultades en el mezclado.

VII RECOMENDACIONES.

- Un agua que contiene poca turbiedad es frecuentemente difícil la floculación, puesto que las partículas sólidas en suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos por lo cual se recomienda determinar el pH óptimo para la coagulación.
- Se recomienda hacer un estudio a nivel de planta piloto para determinar las condiciones de diseño para una planta de tratamiento de agua para la remoción del molibdeno de las aguas del pozo profundo del Tajo de Antamina.
- Se recomienda que el agua utilizada para la prueba no tenga un tiempo de almacenamiento mayor a 24 horas porque el agua podría presentar cambios en su consistencia física y constitución que podrían generar error en el análisis.
- Se recomienda ajustar más el gasto de sulfato férrico necesario para la coagulación para no presentar problemas de exceso del agente químico y posible contaminación.
- Mantener el pH de las soluciones de trabajo en un pH entre 4 y 5.5.
- Se sugiere que para posibles diseños de capas filtrantes el tamaño aproximado del poro de filtración sea menor de 5 micras para la captura del 100% de todos los lodos.

VIII. FUENTES DE INFORMACION.

- American Public Health Association & American Water Works Association & Water Pollution Control Federation: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 15 ed., New York, 1980
- Arboleda Valencia, Jorge A: "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua". CEPIS - OPS Serie Técnica N° 13. Lima, 1972
- Attakoya, S.; Prasad, V.S.; Nagaraja, S.V.: "Performance study of granulated flocculators". En: "Indian journal of environmental health", N° 33 Vol. 4, páginas 498-504. Nagpur, India, 1991
- Barceló, J., "Diccionario tecnológico de química". 2° Edición, 1982.
- De Vargas, Lidia: "Tratamiento de agua para consumo humano - Plantas de filtración rápida". Manual I – Teoría – Tomo I. CEPIS - OPS. Lima, 2004
- Di Bernardo, Luiz: "Redução do Tempo de Floculação em Função do Escalonamento do Gradiente de Velocidade". Trabajo presentado al 21° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 2001
- Gomella, Cyril; Guerrée, Henri: "Tratamiento de aguas para abastecimiento público". Editorial Reverté. Barcelona, España, 1977

- Kemmer, Frank N.; McCallion, John: "Nalco Chemical Company – Manual del Agua". Tomo I. Editorial McGraw – Hill. Mexico D.F., 1997
- Kirk, J., "Diccionario Químico Industrial", 1 ° Edición, pag. 154- 169, 1970.
- Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión del área de Quebrada Antamina. Compañía Minera Antamina Octubre 2007.
- Manual de Entrenamiento de Operación y Supervisión del área de Relaves. Compañía Minera Antamina Octubre 2007.
- Metcalf & Eddy: "Tratamiento y depuración de las aguas residuales". Editorial Labor S.A. Barcelona, España, 1977
- Moncada Camacho, Norma, Diseño de una planta de recuperación de agua, a partir de las descargas del proceso de tratamiento de agua, Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico, 1985.
- Philips Hamer, Tratamiento de aguas residuales, ed. Mc Graw Hill, 1995.
- Plantas de tratamiento de aguas. CEPIS, manuales 13 y 14, 1996.
- Poland, Jenny; Pagano, Todd: "Jar Testing". En: Water Treatment Primer. Environmental Information Management Civil Engineering Dept. Virginia Tech.USA,09/2005.<http://www.cee.vt.edu/ewdenvironmental/teach/wtprimer/jartest/jartest.html>.
- Proyecto de descontaminación de las aguas marinas. IMARPE, 1976.

- Revista, Publicación de la Gerencia de Asuntos Corporativos de la Compañía Minera Antamina, forjando Antamina Números 9,10,11, 12 y 21 del 2010.
- Richter, Carlos; Cánepa, Lidia: "Criterios de Diseño para Floculadores y Decantadores". CEPIS. Serie Filtración Rápida. Manual N° 5. Lima, 1994
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento - SUNASS: "Indicadores de Gestión de las Empresas Prestadoras (año 2004)" Lima, 2005.http://www.sunass.gob.pe/doc/indicadores/indicadores/2004/todo_seps_204.pdf
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento - SUNASS: "Informe de Supervisión y Fiscalización N° 053-2004-SUNASS-0120-F". Lima,12/05/p009.http://www.sunass.gob.pe/docs/fiscalizacion/sedam_5304.htm
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento - SUNASS: "Ranking de desempeño de las Empresas Prestadoras (año 2008)" Lima, 2009. http://www.sunass.gob.pe/recursos/2006_benchmarkirig.pdf.
- Thorpe, E., "Enciclopedia de química industrial" tomo II, 1º edición, pag. 304- 309, 1905.
- Vargas Jorge; Pérez Carrión, José. "Evaluación de los Procesos, Tecnología convencional para tratamiento de aguas" . Manual IV Tomo III. Programa

Regional CEPIS -OPS Lima de Mejoramiento de la calidad de agua para consumo humano. 1992.

- Piteau. Diseño Conceptual del Sistema de Tratamiento de aguas en

Quebrada Antamina del 2002.

- Klohn Crippen SWMS Upgrade design for Antamina Mine del 2005.

- Ecometrix Estudio de Ecotoxicología de las aguas de Quebrada Carash y

Pampa Moruna del 2006.

- CEMI Canadian Environmental & Metallurgical Inc. Mayo 2006.

- Manual de Entrenamiento de Operación de la Concentradora,

Concentrating. Compañía Minera Antamina 2001.

IX. APÉNDICES

ANEXOS

REACTIVOS USADOS EN FLOTACIÓN

Flotación Cobre:

- Sulfato de Zinc ($ZnSO_4$).
Depresor de Zinc.
- Cianuro de Sodio (NaCN).
Depresor de sulfuros.
- Xantato Amílico Potasio (PAX).
Colector de Cobre
- Metil Isobutil Carbinol (MIBC).
Espumante para Cobre.
- Lechada de cal.
Modificador de pH.

Flotación Zinc:

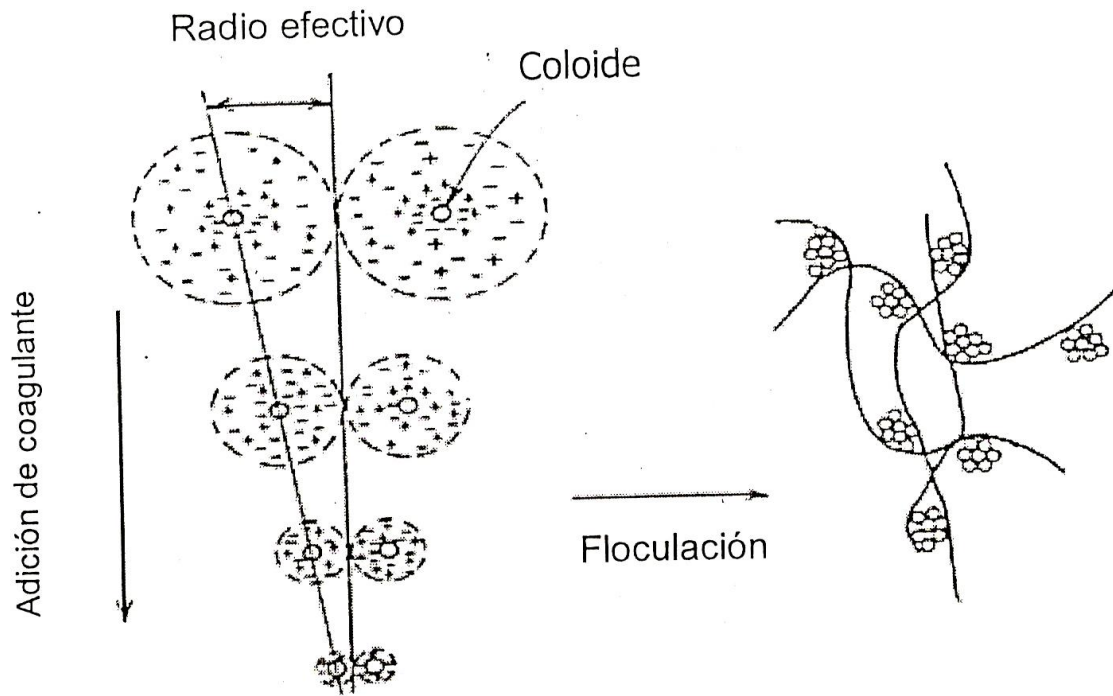
- Sulfato de Cobre ($CuSO_4$).
Activador de Zinc.
- Lechada de cal.
Modificador de pH.
- Xantato Isopropílico de Sodio (SIPX).
Colector de Zinc
- Dowfroth 250 (DF250).
Espumante para Zinc

Flotación Molibdeno/Bismuto

- Fuel Oil.
Colector de Molibdeno.
- Gas Carbónico (CO_2).
Empleado para generar espuma.
- Hidrosulfuro de Sodio (NaSH).
Depresor de Cobre.
- Carbon activado.
Adsorbente de reactivos.

ANEXO 2

PROCESO DE COAGULACIÓN



ANEXO 3

ÁBACO DE CAMP PARA RELACIONAR
RPM vs. G EN ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS [2]

