

Universidad Nacional
“José Faustino Sánchez Carrión”

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

Para Optar el Título de
INGENIERO METALURGICO

OPTIMIZACION PARA LA RECUPERACION DE AGUA APARTIR
DE LOS RELAVES DE HIERRO Y COBRE MEDIANTE EL USO DE
ESPEADORES EN LA EMPRESA MINERA SHOUXIN – 2018

Autor

GIANFRANCO DANIEL SANTOS SAAVEDRA

Asesor

Ing. DELICIAS EUFEMIA NATIVIDAD HUASUPOMA

CIP: 085351

Huacho - Perú

2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi madre Elva Roxana Saavedra Villanueva, por su apoyo incondicional durante todo el tiempo.

A mi hermano y abuelos por el apoyo emocional que siempre me proporcionaron.

Gianfranco Daniel Santos Saavedra

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo es dedicado a mi familia, quienes han sido parte fundamental para poder lograr mis metas propuestas, ellos son quienes me dieron grandes enseñanzas y los principales protagonistas de mis logros.

A mis amigos y compañeros de aula, por los hermosos e inolvidables momentos vividos en nuestra etapa universitaria que compartimos.

Gianfranco Daniel Santos Saavedra

INDICE GENERAL

Portada.	1
Dedicatoria.	2
Agradecimiento.	3
Índice general.	2
Índice de figuras.	7
Índice de tablas.	8
Resumen.	9
Abstract	11
Introducción.	13
CAPITULO I: Planteamiento del Problema.	
1.1. Descripción de la realidad problemática.	14
1.2. Formulación del problema.	15
1.2.1. Problema general.	15
1.2.2. Problemas específicos.	15
1.3. Objetivos.	16
1.3.1. Objetivo general.	16
1.3.2. Objetivos específicos.	16
1.4. Justificación de la investigación.	16
1.5. Delimitación del estudio.	17
1.5.1. Delimitación temporal.	17
1.5.2. Delimitación espacial.	17
1.5.3. Delimitación académica.	17
1.6. Viabilidad de estudio.	18
1.6.1. Viabilidad de recurso teórico.	18
1.6.2. Viabilidad de recurso humano.	18
1.6.3. Viabilidad de recurso temporal.	18
1.6.4. Viabilidad de recurso financiero	19

CAPITULO II: Marco Teórico.

2.1. Antecedentes de la investigación.	20
2.1.1. Investigación relacionada con el estudio.	20
2.2. Bases Teóricas.	23
2.2.1. Uso del agua en operaciones mineras.	23
2.2.2. Relaves mineros.	24
2.2.3. Separación solido-liquido.	26
2.2.3.1. Sedimentación o espesamiento.	26
2.2.3.2. Leyes de la sedimentación.	27
2.2.3.3. Factores que influyen en la separación solido-liquido.	28
2.2.3.3.1. Tamaño de partícula y granulometría.	28
2.2.3.3.2. Concentración de sólidos.	28
2.2.3.3.3. Forma de la partícula características superficiales.	28
2.2.3.3.4. Viscosidad y densidad relativa del líquido.	29
2.2.4. Floculantes.	29
2.2.4.1. Tipos de floculantes.	30
2.2.4.1.1. Floculantes minerales.	30
2.2.4.1.2. Floculantes naturales.	31
2.2.4.1.3. Floculantes sintéticos.	31
2.2.5. Espesadores.	32
2.2.5.1. Componentes del espesador.	35
2.2.5.1.1. Componentes estructurales.	35
2.2.5.1.2. Equipos de instrumentación.	42
2.2.5.2. Tipos de espesadores.	45
2.2.5.2.1. Espesadores convencionales.	45
2.2.5.2.2. Espesadores de alta capacidad.	46
2.2.5.2.3. Espesadores de alta densidad.	47
2.3. Definiciones conceptuales.	48
2.4. Formulación de hipótesis.	49
2.4.1. Hipótesis general.	49
2.4.2. Hipótesis específicas.	50

CAPITULO III: Metodología.	
3.1. Diseño metodológico.	51
3.1.1. Tipo de investigación.	51
3.1.2. Nivel de investigación.	51
3.1.3. Diseño de la investigación.	52
3.2. Población y muestra.	53
3.2.1. Población.	53
3.2.2. Muestra.	53
3.3. Operacionalización de variables e indicadores.	53
3.4. Técnica e instrumentos de recolección de datos.	54
3.4.1. Técnicas a emplear.	54
3.4.2. Descripción de los instrumentos.	55
3.5. Técnicas para el procesamiento de la información.	56
CAPITULO IV: Resultados.	
4.1. Procedimientos realizados para la optimización.	57
4.1.1. Características del relave.	57
4.1.2. Selección del floculante.	59
4.1.3. Dosificación y concentración del floculante.	63
4.1.4. Determinación de la concentración de sólidos.	64
4.1.5. Porcentajes de sólidos.	65
CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones.	
5.1. Conclusiones.	67
5.2. Recomendaciones.	68
CAPITULO VI: Fuentes de información.	
5.1. Fuentes bibliográficas.	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Depósito de relave minero.	25
Figura 2:	Proceso de floculación.	30
Figura 3:	Esquema de un espesador convencional.	33
Figura 4:	Zonas de sedimentación en los espesadores.	34
Figura 5:	Elementos básicos de los espesadores.	35
Figura 6:	Estructura de soporte tipo puente.	38
Figura 7:	Perfil de concentración de sólidos en un espesador.	44
Figura 8:	Espesador convencional.	46
Figura 9:	Espesador de alta capacidad.	47
Figura 10:	Espesador de alta densidad.	47
Figura 11:	Velocidad de sedimentación de los floculantes.	62
Figura 12:	Velocidad de sedimentación del floculante PHP30.	64
Figura 13:	Resistencia a la fluencia vs porcentaje de sólidos de los relaves.	66

INDICE DE TABLAS

Tabla	1: Variables e Indicadores.	54
Tabla	2: Análisis granulométrico de la muestra general.	58
Tabla	3: Análisis granulométrico de la muestra alimentada la filtro.	58
Tabla	4: Característica metalúrgica del relave.	59
Tabla	5: Característica de la pulpa del relave.	60
Tabla	6: Resultados de la selección de floculante.	61
Tabla	7: Resultados de la sedimentación.	62
Tabla	8: Dosificaciones del floculante seleccionado.	63
Tabla	9: Resistencia a la fluencia vs porcentaje de sólidos.	65

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se detalla el proceso de optimización para la recuperación de agua contenida en los relaves mineros de hierro y cobre tratados mediante espesadores por la empresa minera SHOUXIN, para su recirculación y uso en los procesos y operaciones principales que se ejecutan en la empresa minera.

En el capítulo I, se describe la realidad problemática, sustento de la realización del presente trabajo de investigación. También se especifica los objetivos que se pretende lograr a la vez la justificación del porque se realiza, la delimitación con la que se enmarca el estudio y la viabilidad del trabajo de investigación.

En el capítulo II se plasma los antecedentes de investigación que se usaron como referencia, también el marco teórico donde se recopila las principales teorías utilizada en el presente trabajo de investigación. Se formulan la hipótesis general y específicas bases para el inicio de la investigación.

El capítulo III, contiene el diseño metodológico, los tipos de investigación, el nivel y enfoque que se da al presente trabajo de investigación. Se limita la población y muestra que se va a abarcar; se describe las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos necesarios para realizar el presente trabajo.

En el capítulo VI, se detalla y presenta los resultados obtenidos durante el tiempo que se realizó el trabajo de investigación, mediante cuadros, gráficas y la realización de las interpretaciones de las mismas.

En el capítulo V, se realizó la discusión que se generaron al realizar el análisis de los resultados obtenidos; se determina las conclusiones y se da las recomendaciones necesarias en base a los resultados obtenidos.

Las fuentes bibliográficas o de información que se usaron y fueron de apoyo durante la realización del presente trabajo se detalla en el capítulo VI; como parte final se anexa datos que son relevantes durante la ejecución del trabajo.

Palabras Claves: *Espesadores, Optimización, Relaves, Recuperación de agua.*

ABSTRACT

In the present work of investigation the process of optimization for the recovery of water contained in the mine tailings of iron and copper treated by means of thickeners by the mining company SHOUXIN is detailed, for its recirculation and use in the processes and main operations that are executed in the mining company.

In chapter I, the problematic reality is described, sustaining the realization of this research work. It also specifies the objectives to be achieved at the same time the justification of why it is done, the delimitation with which the study is framed and the viability of the research work.

Chapter II shows the research background that was used as a reference, as well as the theoretical framework where the main theories used in this research work are compiled. The general hypothesis and specific bases for the initiation of the investigation are formulated.

Chapter III contains the methodological design, the types of research, the level and focus given to the present research work. The population is limited and shows that it will be included; The techniques and instruments used to collect the data necessary to carry out the present work are described.

In chapter VI, the results obtained during the time the research work was carried out are detailed and presented, by means of tables, graphs and the realization of the interpretations of them.

In chapter V, the discussion that was generated when performing the analysis of the results obtained was carried out; the conclusions are determined and the necessary recommendations are given based on the results obtained.

The bibliographic or information sources that were used and were supportive during the realization of this work are detailed in chapter VI; As a final part, data that is relevant during the execution of the work is attached.

Key words: *Thickeners, Optimization, Tailings, Water recovery.*

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se basa en realizar una propuesta de optimización a los procesos de recuperación de agua ya instalados en la planta de espesadores de la empresa minera SHOUXIN, la cual procesa los relaves mineros de hierro y cobre provenientes de las actividades minera de la empresa SHOUGANG en el departamento de Ica; con la finalidad de obtener una alternativa ante el problema de escases de agua para los procesos minero – metalúrgicos que se presentan en la zona.

La caracterización metalúrgica, espesamientos y reología a nivel laboratorio, de las muestras de relave de hierro y cobre producidos por la minera SHOUXIN, y el conocimiento de las propiedades físico químico de los relaves a tratar es fundamental para poder realizar una buena optimización de los espesadores para la recuperación de agua a partir de los relaves mineros a tratar.

La utilización de distintos tipos de floculantes durante el estudio puede ser determinante para obtener la velocidad optima de sedimentación y poder lograr una mejor recuperación del agua contenido en los relaves tratados.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La empresa Minera SHOUXIN Perú S.A. realiza sus operaciones en el distrito de San Juan Marcona mediante la explotación de relaves de hierro y cobre procedentes de los procesos mineros metalúrgicos de la empresa SHOUGANG HIERRO PERU S.A.A. Por encontrarse en una zona árida presenta una escasa precipitación, haciendo que el balance hídrico sea deficiente.

Durante las operaciones mineras es indispensable el uso del agua en los procesos que estas realizan para poder operar, haciendo del agua un recurso valioso mas aun cuando este es escaso. Mediante técnicas de separación Solido-Líquido y el uso de espesadores se logra extraer un porcentaje considerado de agua de los relaves tratados sin embargo queda un porcentaje de agua en las descargas de sólidos que evacuan de los espesadores.

Teniendo la necesidad de obtener la mayor cantidad posible de agua para ser nuevamente empleado en las operaciones de la mina, se pretende optimizar esta operación, con una selección adecuada de instrumentación y espesadores de alta capacidad, sumado una selección de técnicas que nos permita obtener un gran porcentaje de recuperación de agua de los relaves tratados en la planta.

Según lo expuesto se considera la necesidad de optimizar las operaciones en el área de espesadores de tratamiento de relaves de hierro y cobre, para la recuperación de agua en la empresa minera SOUXIN S.A.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema General.

¿En qué medida se puede optimizar la recuperación de agua a partir de los relaves de hierro y cobre mediante el uso de espesadores en la empresa minera SHOUXIN?

1.2.2. Problemas Específicos.

- ¿En qué medida la caracterización físico químicas de los relaves permiten optimizar la recuperación del agua?
- ¿En qué medida la determinación del efecto de dosificación de floculante sobre la velocidad de sedimentación mejora la recuperación del agua?
- ¿En qué medida la selección de los criterios óptimos para la elección de equipos e instrumentos ayudan en la eficiencia de separación solido-liquido?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General.

Optimizar la recuperación de agua a partir de los relaves de hierro y cobre mediante el uso de espesadores en la empresa minera SHOUXIN.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Caracterizar las propiedades físico químicas de los relaves para determinar una buena optimización durante la recuperación del agua.
- Determinar el efecto de la dosificación de floculante sobre la velocidad de sedimentación para una mejor recuperación del agua.
- Seleccionar los criterios óptimos para la elección de equipos e instrumentos que ayuden en la eficiencia de separación solido-liquido.

1.4. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación es justificada debido a la gran demanda de agua que requiere la minera SHOUGANG HIERRO PERU S.A.A. para poder realizar sus operaciones, en vista en que la zona geográfica donde se encuentra el recurso hídrico disponible es escasa siendo prioridad de la empresa el lograr la mayor captación de agua

posible. Siendo una alternativa la optimización en las operaciones de los espesadores para una mayor cantidad de recuperación de recurso hídrico disponibles en los relaves mineros.

1.5. DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO

1.5.1. Delimitación temporal.

La información a ser consignada para la realización del trabajo de investigación propuesto, se centra en datos obtenidos durante el proceso de recuperación de agua en los espesadores en el periodo enero a junio del año 2018, considerando los parámetros de operación de los mismos y su análisis para una mejor optimización.

1.5.2. Delimitación espacial.

El presente trabajo de investigación se realiza dentro del área de espesadores de la empresa minera SOUXIN S.A. ubicada en el distrito de San Juan de Marcona, en la provincia de Nazca, departamento de Ica.

1.5.3. Delimitación académica.

El informe de investigación cumple con los lineamientos exigidos por la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión plasmado en la resolución

que hace referencia al grado de investigación y el esquema de presentación para el trabajo de tesis, esto se sustenta en bibliografías, textos, informes, reportes y estudios que proporcionan conceptos y teorías sobre la recuperación y optimización de agua contenida en los relaves mineros.

1.6. VIABILIDAD DEL ESTUDIO

1.6.1. Viabilidad de recurso teórico.

El tema de investigación “OPTIMIZACION PARA LA RECUPERACION DE AGUA APARTIR DE LOS RELAVES DE HIERRO Y COBRE MEDIANTE EL USO DE ESPESADORES EN LA EMPRESA MINERA SHOUXIN – 2018”; cuenta con el suficiente acceso de información primaria tanto en libros, revistas, código, normas, internet, etc.

1.6.2. Viabilidad de recurso humano.

El estudio es viable, los recursos que el trabajo de investigación requiere es asumido por el tesista conjuntamente con apoyo del personal de la empresa minera.

1.6.3. Viabilidad de recurso temporal.

El presente trabajo de investigación se realiza en un corto plazo de aproximadamente siete meses dentro del año en curso, por la ejecución de todos

los procesos de investigación tales como: el planteamiento del problema, marco teórico, diseño de la investigación, tabulaciones y conclusiones.

1.6.4. Viabilidad de recurso financiero.

Si es viable, por medio de recursos económicos propios del tesista de manera que el proyecto no requiere de un financiamiento mayor o ser auspiciado por alguna empresa o entidad.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION.

2.1.1. Investigación relacionada con el estudio.

- a) Según López Cutipa, O. (2018), en su trabajo de investigación intitulado: ***Diseño de un Sistema Experto para Optimizar la Operación de los Espesadores de Relaves de Alta Capacidad en una Planta Concentradora de Cobre***; concluye que la optimización en la operación de espesamiento se logra manteniendo un sólido en la descarga lo más alto posible, puesto que permite recuperar la mayor cantidad de agua de proceso. El Controlador Difuso permite garantizar la continuidad en la operación, puesto que trabaja de manera automática, por lo que requiere instrumentación confiable. El control Difuso permite establecer un control sin necesidad de conocer el modelo matemático de la planta, atractivo en sistemas complejos y no lineales, puesto que se basa en la experiencia de los operadores de campo.

Las variables de entrada deben proveer la máxima información posible del proceso, para no crecer en complejidad en el diseño del controlador difuso. La definición de las funciones de membresía, así como su número, es importante para el correcto desempeño del controlador difuso. Es importante la correcta definición de las “Reglas de Inferencia” puesto que estas

determinan el comportamiento del Controlador Difuso. La definición de cada una de las partes del controlador difuso constituye un proceso de prueba y error puesto que no existe un procedimiento para su determinación. El método del centroide en relación al del promedio ponderado presenta un error en menor al 0.5%. (López Cutipa, 2018)

- b) Según Palli Calla R. (2016), en su trabajo de investigación intitulado: ***Dimensionamiento y Optimización de un Sedimentador Convencional de Relaves de Cobre en una Planta de Procesamiento de 850 TMD***, concluye que el estudio realizado indica que es factible el dimensionamiento y la optimización de un espesador convencional de relaves como un sistema de recuperación de agua a partir de relaves de flotación de cobre mediante tecnologías de espesamiento. Para el dimensionamiento del espesador se tomó en cuenta la metodología de Talmage and Fitch, el cual depende de la curva de sedimentación trazada en la experiencia del laboratorio, se concluye que el espesador tendrá un diámetro es de 50 pies y una altura de 10 pies, se debe mencionar que estos cálculos ya consideran un factor de seguridad de 15 %.

De los floculantes evaluados, se seleccionó al PHP 20 por presentar un buen comportamiento en relación con la velocidad de sedimentación formación de flósculos y clarificación. Se determinó que el consumo de floculante optimo en la prueba de velocidad sedimentación es de 90 gr/t con pulpa de relave sin dilución el cual es muy alto, por lo que es necesario complementar con dilución de la pulpa de relave. De acuerdo al flux evaluado en función del % de sólidos,

se observa que la floculación y velocidad de sedimentación son óptimas en el rango 9 y 12 % de sólidos, la más adecuada es a 10.5 % a esta dilución se determinó que la dosificación de floculante es de 40 gr/t, concentración de dilución de 0.05%. (Palli Calla, 2016)

- c) Según Anaya Huamán R. (2016), en el trabajo de investigación intitulado: ***Estudio de la Influencia del Espesador de Cono Profundo, para la Recuperación de Agua en la Compañía Minera Volcán S.A.,*** concluye que con el adecuado control de la cantidad de elementos que ingresan al espesador de cono profundo (floculante, cal, pulpa, agua fresca) que influye directamente en la recuperación de agua ya que de acuerdo a los análisis obtenidos hemos recuperado mayor a 70 m³/h de agua de proceso. Con la ejecución de la segunda etapa del proyecto de espesador de cono profundo “DCT”, aparte de la recuperar agua, también se recupera solución (Minerales-Oro y plata) que posteriormente son enviados al tanque de almacenamiento de planta.

Logrando así mayor disponibilidad y cantidad de agua de 70m³/h para proceso en el área de molienda y con ello mejorar la concentración de dichos minerales. Se realizó los trabajos de montaje de estructuras, planchas, construcción de bases para espesador, bombas, tanques y montaje de los equipos sin perjudicar la operación de recuperación de agua de la Planta minera de volcán S.A, ya que cuentan con sistema automatizado. Se concluye que las condiciones generales del lugar para el desarrollo del proyecto

establecen especificaciones a las condiciones que gobiernan el diseño, la selección y el suministro de todos los componentes y/o equipos del proyecto entre los 4330 y 4375 msnm., con Temperaturas Máxima: 16.25°C y Mínima: 12.31°C. Humedad Relativa: 63% - 80% en la región conocida como Puna o Sierra Alta. (Anaya Huamán, 2016)

2.2. BASES TEORICAS.

2.2.1. Uso del agua en operaciones mineras.

El agua en la minería se utiliza en los procesos de exploración, en la explotación y en aquellos como los de concentración por flotación, en la fusión y electro refinación, o en el proceso hidro-metalúrgico, el que consta de lixiviación, extracción por solventes y electro obtención. Cada proceso u operación unitaria de la minería utiliza en mayor o menor medida volúmenes de agua para contribuir a la eficiencia del proceso. (Cupita Gonzales, 2017)

Por ejemplo, en las plantas de concentradoras el procesamiento de minerales representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales. Involucra la trituración (chancado) y molienda del mineral, luego la flotación, clasificación y espesamiento. Su mayor consumo se da en la flotación, el transporte de concentrados y desechos (relaves) y la evaporación e infiltración en los tanques. Con frecuencia el mineral es acondicionado previo a la molienda. La flotación del mineral es físico-química: consiste en extracción mineral, no como tal, sino que de

partículas del mineral que lo contienen en combinación con azufre. Ello significa que se le agrega agua en exceso y algunos reactivos que son importantes en la flotación, y por lo general en un pH alcalino (10 a 11). Por lo tanto, es necesario añadir algún reactivo, usualmente cal, para elevar el pH, desde 7 que contiene el agua natural, hasta 10 u 11. El producto de estas plantas de flotación es un concentrado que contiene entre 20 y 40 por ciento de mineral. (Cupita Gonzales, 2017)

El agua del proceso de flotación se usa también para transportar los concentrados y los materiales de desecho hacia el tranque de relaves. Según la distancia entre la concentradora y las instalaciones de filtrado y almacenaje, las aguas residuales pueden o no ser recirculadas al proceso. Cuando ello no es posible, una parte del agua se destina a uso industrial y el resto se devuelve al ambiente bajo condiciones controladas. Una parte importante del agua que se utiliza en la flotación pasa a formar parte de los desechos o relaves, jales, colas, etc., que se envían a la etapa de espesamiento para recuperar una parte del agua que contienen. (Cupita Gonzales, 2017)

2.2.2. Relaves mineros.

Toda planta minera cuyo proceso de concentración es flotación produce residuos sólidos que se denominan relaves y que corresponden a una suspensión fina de sólidos en líquido, constituidos fundamentalmente por el mismo material presente en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, formando una pulpa, que se genera y desecha. La razón aproximada de

agua/sólidos del relave van del orden de 1:1 a 2:1. Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerá de la razón agua/sólidos y también de las características de las partículas sólidas, como se muestran a continuación: (Gómez Paredes, 2012)

- Una masa de relaves con un gran contenido de agua escurrirá fácilmente, incluso con pendientes pequeñas.
- Una masa de relaves con un contenido de agua suficientemente bajo (por ejemplo, relaves filtrados) no escurrirá gravitacionalmente.
- Si las partículas sólidas son de muy pequeño tamaño (equivalentes a arcillas), se demorarán un gran tiempo en sedimentar, manteniéndose en suspensión y alcanzando grandes distancias respecto al punto de descarga antes de sedimentar.
- Si las partículas sólidas son de gran tamaño (equivalentes a arenas) sedimentarán rápidamente y se acumularán a corta distancia del punto de descarga.

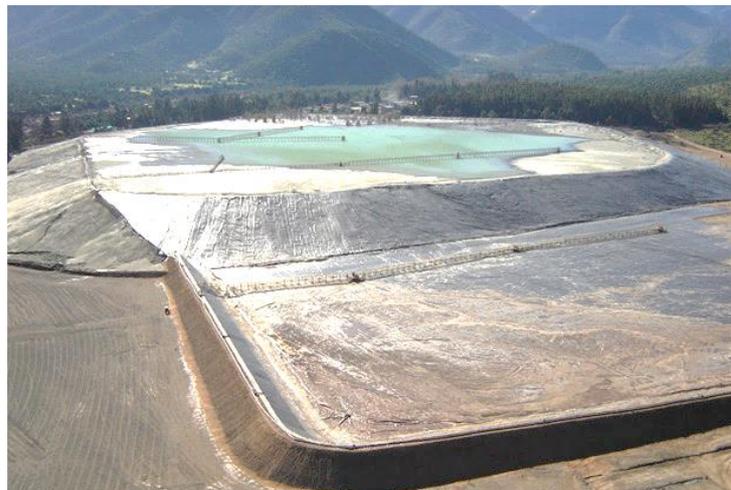


Figura 1. Depósito de relave minero.

2.2.3. Separación sólido-líquido.

La mayor parte de operaciones de beneficio de minerales emplean el uso de cantidades significativas de agua para su tratamiento. Para lograr la separación sólida/líquido posterior se cuenta actualmente, de manera general, con tres metodologías: espesamiento, filtración y secado térmico. En general, 75% a 80% del agua puede ser removida por medio de espesadores y cerca del 90% con filtros en etapas posteriores. El espesamiento es la técnica de desaguado más ampliamente usada debido a que es relativamente barato, permite una alta capacidad de procesamiento y provee las mejores condiciones para la floculación debido a sus muy bajas fuerzas de corte. (Palli Calla, 2016)

2.2.3.1. Sedimentación o espesamiento.

Se define el espesamiento como el proceso mediante el cual, por acción de la gravedad, se provoca a partir de una mezcla bifásica el asentamiento de las partículas sólidas suspendidas en un líquido, generando una pulpa espesada en la parte inferior y un líquido clarificado sobrenadante en la parte superior. Si bien, los más importantes desarrollos tecnológicos modernos para el espesamiento se han desarrollado en la industria minera, en especial en la industria metalúrgica, donde las aplicaciones más exigentes y robustas han sido requeridas, hoy en día encontramos soluciones en la industria química y de aguas residuales, entre otras. (Cabrejos Salinas, 2011)

2.2.3.2. Leyes de la sedimentación.

En los procesos de sedimentación juega un papel importante la relación de dilución, así como el tamaño de la partícula. De manera práctica, se observa que al verter una pulpa diluida en un cilindro y si se deja asentar, se observa lo siguiente: (Cabrejos Salinas, 2011)

- Las partículas más gruesas son las primeras en llegar al fondo con relativa facilidad y con mayor velocidad que las de menor tamaño.
- Enseguida a la sedimentación de las partículas gruesas, sigue la de los limos llenando los intersticios entre las partículas más gruesas.
- Las partículas más finas, las cuales se asientan lentamente, permanecen en suspensión en la parte superior.

En general el movimiento de todas las partículas suspendidas en un fluido, salvo las coloidales, están gobernadas por las leyes de Stokes, (también llamadas leyes de Newton), las cuales son directamente proporcionales al tamaño de las partículas. La ley de Stokes determina la velocidad terminal (W) de la partícula en un fluido cualquiera, tal como se presenta en la siguiente ecuación. (Cabrejos Salinas, 2011)

$$W = \frac{2(SGs - SGl)}{9\mu} gR^2$$

Donde:

W : *Velocidad terminal.*

SGs : *Gravedad específica del sólido.*

SGL : Gravedad específica del líquido.

g : Aceleración de la gravedad.

R : Radio esférico de la partícula.

2.2.3.3. Factores que influyen en la separación solido-liquido.

2.2.3.3.1. Tamaño de partícula y granulometría.

Generalmente las partículas finas tienen ratios más bajas y sedimentación. Un incremento del área superficial significa una menor concentración en la salida inferior del concentrador (underflow) en la descarga. (Palli Calla, 2016)

2.2.3.3.2. Concentración de sólidos.

El incremento de la concentración de sólidos generalmente minimizará el tamaño de los equipos requeridos y el costo en todas las etapas de separación de solido-liquido. La mayor parte de los espesadores son diseñados sobre la base de la unidad de área requerida (metro cuadrado por tonelada corta seca por día) que disminuirá conforme aumenta la concentración de sólidos en la alimentación. (Palli Calla, 2016)

2.2.3.3.3. Forma de la partícula características superficiales.

Normalmente la forma óptima de la partícula es la esférica con porosidad cero. Cuando cualquiera de estos factores se aleja de su estado ideal, las dificultades se

incrementan. Las características químicas de la superficie de las partículas va a influir en factores como la dosificación de floculantes. (Palli Calla, 2016)

2.2.3.3.4. Viscosidad y densidad relativa del líquido.

El incremento de la viscosidad disminuirá la ratio de sedimentación. Un mantenimiento de temperaturas altas será siempre deseable puesto que va a disminuir la viscosidad del agua. (Palli Calla, 2016)

2.2.4. Floculantes.

Polímeros orgánicos de cadena larga y alto peso molecular (> 100), solubles en agua que, al formar puentes o uniones entre partículas, forman una partícula de un mayor tamaño aparente, dando lugar a agrupaciones de partículas que sedimentaran más rápido, acelerando de esta forma el proceso de separación sólido líquido. (Palli Calla, 2016)

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas primero en microflóculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos. Estos flóculos inicialmente son pequeños, pero se juntan y forman aglomerados mayores capaces de sedimentar. Para favorecer la formación de aglomerados de mayor tamaño se adicionan un grupo de productos denominados floculantes. (Palli Calla, 2016)

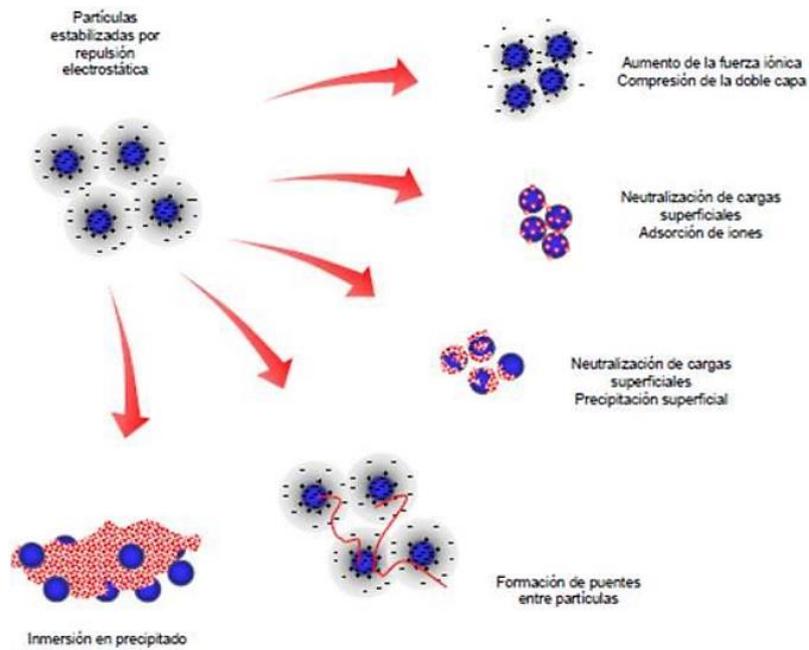


Figura 2. Proceso de floculación.

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas. (Palli Calla, 2016)

2.2.4.1. Tipos de floculantes.

2.2.4.1.1. Floculantes minerales.

Son compuestos muy coloidales que reaccionan por absorción o por neutralización de las cargas de las partículas en suspensión, sílice activada, bentonita, hidróxido férrico, etc. (Palli Calla, 2016)

2.2.4.1.2. Floculantes naturales.

Son polímeros solubles en agua, los más comunes son los derivados amílicos, los polisacáridos, los alginatos, (extractos de algas). (Palli Calla, 2016)

2.2.4.1.3. Floculantes sintéticos.

Son polímeros sintéticos de peso molecular muy alto, solubles en agua, los floculantes sintéticos incluyen tipos no iónico, aniónico y catiónicos, de varios tamaños de moléculas todo ello para proporcionar un rendimiento óptimo en cualquier tipo de suspensión. (Palli Calla, 2016)

- **Floculantes aniónicos.**

Son los más usados en la sedimentación de pulpas de minerales y concentrados, tales como Cu, C, Pb, Zn, etc. Estos son eficientes en la mayoría de las suspensiones que contienen minerales u otros sólidos inorgánicos, particularmente bajo condiciones neutras o alcalinas. Los consumos o dosificaciones típicos varían entre 2 a 50 gr/t (gramos de floculante por tonelada de sólidos secos). (Palli Calla, 2016)

- **Floculantes no iónicos.**

Son también usados en la sedimentación de pulpas de minerales de Fe, y flotación de Oro etc., son muy efectivos en pulpas ácidas. Los consumos o dosificaciones típicos varían entre 1 a 50 gr/ton. También pueden usarse como ayuda filtrante. (Palli Calla, 2016)

- **Floculantes catiónicos.**

Son principalmente usados en la sedimentación de desperdicios de carbón, lamas de mineral de hierro y concentrados de minerales, etc. Estos son eficientes en los sistemas que contienen sólidos orgánicos o con pH bajo. Los consumos o dosificaciones típicos varían entre 25 a 250 gr/ton. Son también efectivos para la clarificación de las aguas extraídas de la mina en dosificaciones de 5 a 50 gr/ton. (Palli Calla, 2016)

2.2.5. Espesadores.

Los espesadores están compuestos por un tanque circular, la alimentación es realizada por la región central lo que permite la distribución homogénea de la pulpa de forma que la sedimentación pueda ocurrir adecuadamente. Las principales características de un espesador convencional son: (Gómez Paredes, 2012)

- Tanque cilíndrico.
- Parte inferior del tanque cónica.
- Caja de alimentación "Feedwell".
- Canaleta para la recuperación de agua clarificada, overflow.
- Rastra.

Como se puede apreciar en la figura los principales componentes de los espesadores, el feedwell compuesto de un cilindro concéntrico al estanque y de pequeño diámetro, cuyo objetivo principal es permitir una buena distribución de la alimentación al espesador, además de mejorar la mezcla de la pulpa y el floculante,

y en algunos casos para diluir la alimentación. El cilindro puede tener baffles internos y agujeros para la entrada de agua de dilución. (Gómez Paredes, 2012)

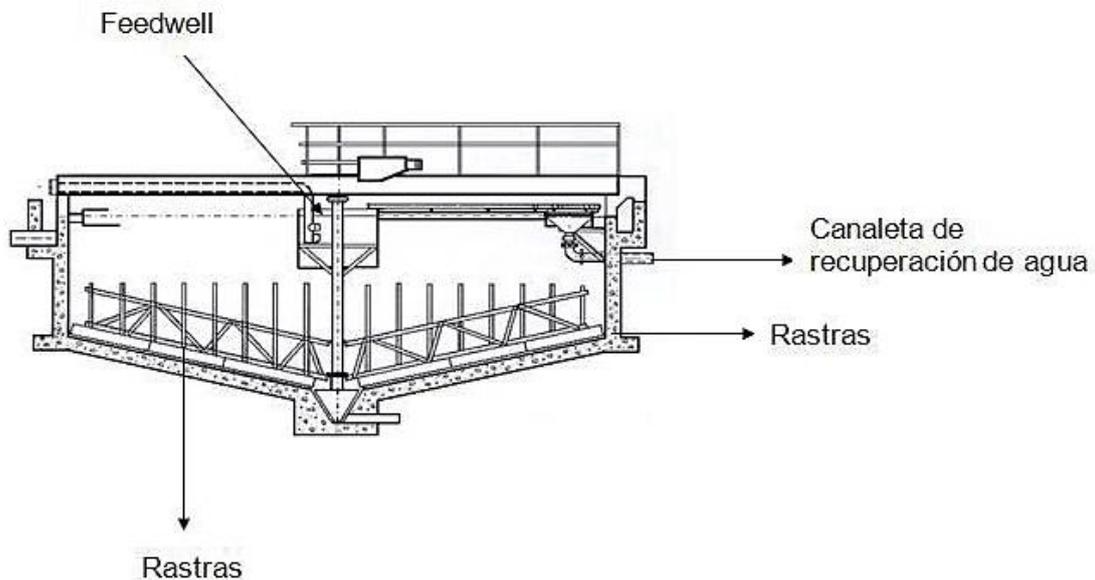


Figura 3. Esquema de un espesador convencional.

La rastra tiene por objetivo llevar el material depositado en el fondo del espesador hacia la abertura de descarga. Un resultado secundario de las rastras es la formación de canales a su paso por el material depositado, por los cuales escurre agua, permitiendo un aumento de la concentración del sedimento. La tracción de las rastras puede ser a través de un motor central ubicado en la parte superior del eje o periférica, con el motor montado sobre rieles en el borde del estanque del espesador. (Gómez Paredes, 2012)

Las canaletas de rebalse en la periferia del espesador tienen por objetivo evacuar el agua recuperada a una velocidad suficientemente baja para evitar el arrastre de partículas finas. (Gómez Paredes, 2012)

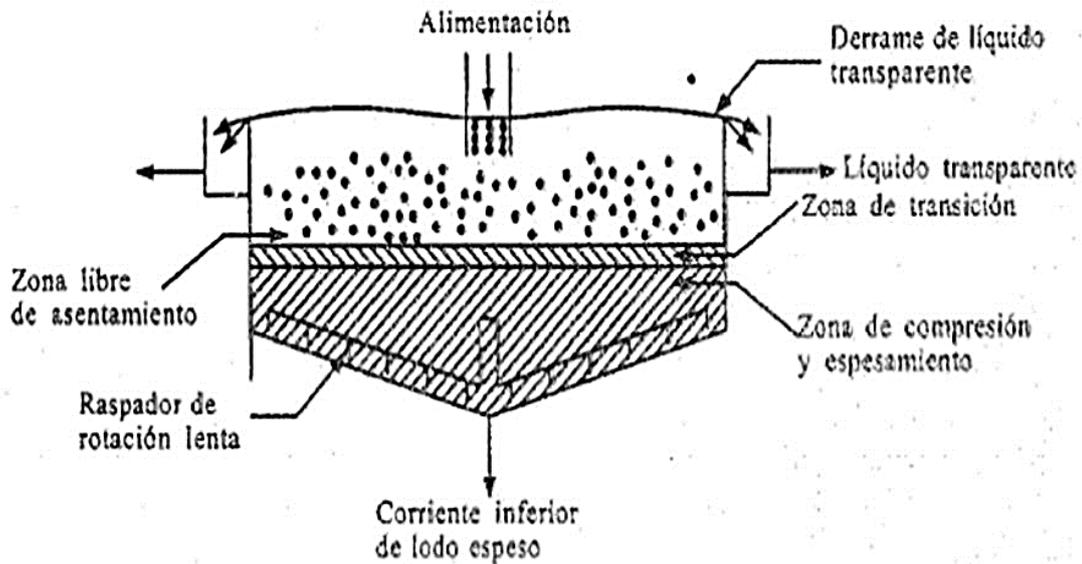


Figura 4. Zonas de sedimentación en los espesadores.

El espesamiento es un tipo de separación sólido líquido basado en la sedimentación, en este proceso se presentan cuatro regímenes distintos, denominados: Zona de agua clarificada, Zona de alimentación, Zona de transición y Zona de compresión. (Gómez Paredes, 2012)

Los regímenes de clarificación predominan en situaciones de mayor dilución de pulpa donde las partículas sólidas están más distantes unas de las otras. (Gómez Paredes, 2012)

En la zona de Alimentación puede ocurrir un aumento de la concentración de partículas de la pulpa como el aumento en la tendencia a la formación de agregado. (Gómez Paredes, 2012)

La zona de transición lleva la concentración del interior del espesador a la concentración del sedimento. Esta transición puede efectuarse mediante una onda

de choque, mediante una discontinuidad de contacto, mediante una onda de rarefacción o la combinación de éstas. (Gómez Paredes, 2012)

La zona de compresión se caracteriza por un aumento de densidad de pulpa o a la mayor tendencia de formación de agregados. Las estructuras formadas en este régimen son rígidas de tal forma que cada capa de sólidos puede soportar mecánicamente las capas superiores. (Gómez Paredes, 2012)

2.2.5.1. Componentes del espesador.

2.2.5.1.1. Componentes estructurales.

Independiente del tipo de espesador, existe un grupo de elementos estructurales que componen estos equipos, y que, a partir de las características de cada uno de ellos, dan lugar a espesadores diferentes según sea la aplicación en la que se utilice. (Ojeda Vásquez, 2014)

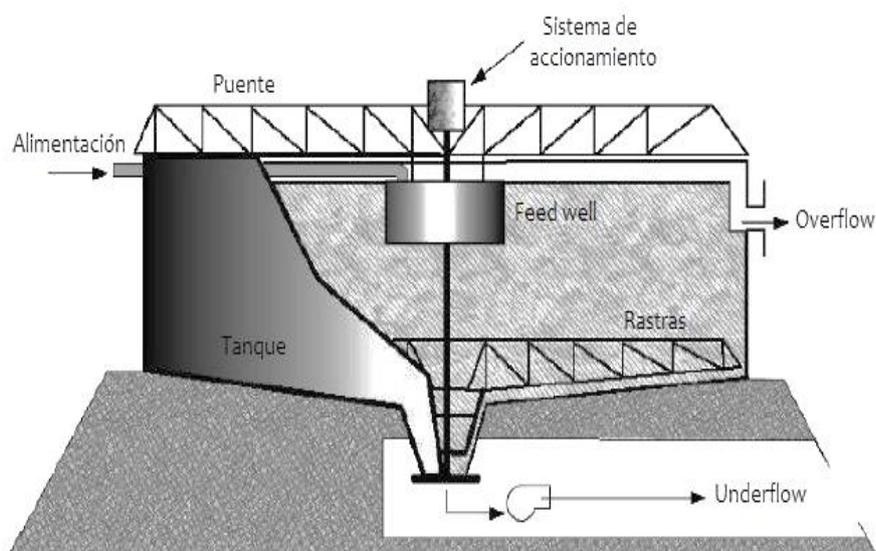


Figura 5. Elementos básicos de los espesadores.

- **Tanque.**

El tanque es la estructura básica de todo espesador, y corresponde al recipiente donde ocurre el proceso de sedimentación y que puede ser construido de materiales tales como acero, concreto, plástico e incluso madera. La selección de este material depende principalmente de factores como las características de la pulpa (corrosión, densidad), condiciones de operación (temperatura, presión), costos, condiciones climáticas y volúmenes de procesamiento. Por su parte la profundidad del tanque, está determinada principalmente por los requerimientos de la capa de compresión, debido a que determina la concentración de sólidos en el underflow dependiendo del tiempo de residencia de las partículas al interior del equipo. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Rastras.**

Las rastras son mecanismos que giran al interior del tanque, conocido también como rastrillos o brazos giratorios. Estos son los encargados de transportar los sólidos sedimentados hacia el punto de descarga central del espesador y al mismo tiempo que generan pequeños canales que permiten liderar el agua atrapada y por ende obtener una cama de lodos con mayor contenido de sólidos. (Ojeda Vásquez, 2014)

El diseño de las rastras depende principalmente de las características de los sólidos, las dimensiones del tanque y el efecto del floculante, aunque frecuentemente se utilizan rastras que poseen dos brazos largos que pueden ir acompañados de otros dos con menor longitud. La gran mayoría de los espesadores, cuentan con rastras que están unidas a un eje central o una

estructura circular giratoria, los cuales se encuentran conectados a un motor que permite el movimiento de los brazos, aunque existen algunas excepciones tales como espesadores donde su giro es guiado por medio de cables. La velocidad de giro de rastras es un punto muy importante en el diseño de un espesador, puesto que deben ser capaces de evitar la acumulación excesiva de sólidos en el fondo del equipo y a su vez, no debe generar turbulencia que impida la correcta sedimentación de las partículas. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Sistema de accionamiento.**

Este sistema es el conjunto de componentes que entregan la fuerza necesaria para permitir el movimiento de la rastra a través de la pulpa espesada, al mismo tiempo que la transporta hacia el punto de descarga del espesador. Estos sistemas son generalmente accionados con el apoyo de unidades mecánicas o hidráulicas. Este conjunto incluye el mecanismo de apoyo que permite transmitir el movimiento a través del eje y debe ser capaz de tener una resistencia adicional adecuada, frente a la posibilidad de sobrecargas temporales generadas por la fricción con la cama de lodos. En este mismo sentido, es importante que el sistema cuente con un control fiable que proteja el mecanismo completo, ante la eventual presencia de una sobrecarga mayor.

En la mayoría de los espesadores, la confiabilidad de los sistemas de accionamiento es fundamental para la operación. Esto se debe a que el correcto funcionamiento de un espesador, depende en gran medida de su capacidad para transportar el sólido espesado hacia el centro del equipo, de lo contrario no puede seguir operando. Esto implica que otro equipo deberá soportar la carga extra (en

caso de existir), o desviar la carga en caso de ser posible, o bien, detener la cadena de producción completa. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Estructura de soporte.**

Los espesadores también pueden ser clasificados por el tipo de estructura que se utiliza para soportar el sistema de accionamiento. De este modo, se pueden reconocer como espesadores “tipo puente” (bridge type) o “tipo pilar central” (centre pier type). En el caso de los primeros, son aquellos cuyo eje central y mecanismo de accionamiento, se sostiene sobre una estructura que atraviesa el tanque y que tiene la fuerza necesaria para resistir el peso completo del mecanismo, además del torque que se ejerce sobre las rastras por efecto de los sólidos sedimentados. Por lo general, se utilizan estructuras “tipo puente” para espesadores de diámetros relativamente pequeños, es decir hasta 30 o 40 metros. (Ojeda Vásquez, 2014)



Figura 6. Estructura de soporte tipo puente.

- **Mecanismo de elevación de rastras.**

La mayoría de los espesadores cuentan con estos mecanismos que permiten levantar la posición de las rastras, frente a ciertas situaciones de emergencia, aunque también puede ser empleado como mecanismo de control. De esta forma, el levantamiento de rastras puede ser utilizado en algunos casos, para evitar un aumento de torque cuando el flujo de descarga es insuficiente, ingresan al equipo sólidos de mayor tamaño o ante acumulaciones menores en el fondo del equipo. Para situaciones como ésta, hay sistemas que permiten levantar las rastras hasta que el torque recupere valores que se consideran normales, a partir de lo cual el mecanismo se baja lentamente hasta su posición original. (Ojeda Vásquez, 2014)

Los mecanismos de elevación de rastras están también configurados para actuar cuando, ante situaciones anormales en la operación, se alcanzan valores de torque excesivos para la estructura. En general se utilizan secuencias que, para límites establecidos de torque, pueden levantar las rastras, activar un sistema de alarmas e incluso detener el movimiento de las rastras y cerrar la alimentación del espesador. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Bandeja de alimentación.**

La bandeja o pozo de alimentación (feed well) se ubica normalmente en el centro del espesador, y recibe la pulpa que se alimenta al equipo por medio de un tubo o canaleta, con el objetivo de reducir la turbulencia del flujo disipando su energía cinética y distribuyéndola de forma uniforme al interior del equipo. Estas bandejas cilíndricas aprovechan el esfuerzo de cizalle para amortiguar la turbulencia del flujo alimentado, obteniendo un régimen de ingreso al equipo lo más

laminar posible, para así evitar que interfiera con aquellos sólidos que ya están sedimentando. (Ojeda Vásquez, 2014)

En la medida que la claridad del overflow es más importante, o bien la gravedad de la pulpa es más cercana a la gravedad específica del líquido, es necesaria la utilización de bandejas de alimentación más profundas y de mayor diámetro. En el caso de los espesadores High Rate, el diseño de bandejas de alimentación más complejas, toma relevancia debido a la importancia de una eficiente mezcla entre el pequeño volumen de floculante y el gran flujo de la corriente principal. De este modo se han desarrollado nuevos modelos que dividen la alimentación en compartimientos al interior de la bandeja, aprovechando el esfuerzo de cizalle para amortiguar la velocidad del flujo y al mismo tiempo introducir el floculante formando una mezcla uniforme. Conectado directamente bajo la bandeja de alimentación, se ubica un cono encargado de distribuir la pulpa al interior del espesador de acuerdo a la forma en que fue diseñado el equipo. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Sistema de recuperación del overflow.**

El overflow como se conoce normalmente al flujo de agua clara recuperada en la parte superior del espesador, se elimina del equipo a través de una canaleta periférica que puede estar ubicada por el borde interior o exterior del tanque. La canaleta debe tener la capacidad de soportar eventuales aumentos en el flujo de agua recuperada, para impedir su inundación y evitar la necesidad de detener momentáneamente la alimentación al equipo o bien, afectar la densidad que se obtiene en la descarga por el underflow. (Ojeda Vásquez, 2014)

El flujo total recuperado a través de la canaleta que bordea todo el equipo, converge hacia una cañería que dirige el agua recuperada hacia algún estanque de almacenamiento o una piscina de retención según sea las condiciones del entorno, y a partir de los cuales puede ser derivado por medio de bombeo hacia las zonas de procesamiento que se requiera. Como se explicó anteriormente, la capa de líquido clarificado rebosa del borde superior del espesador, a través de intersticios consecutivos ubicados a lo largo de todo el perímetro del tanque. Las formas que tienen estas ranuras son generalmente de dos tipos: la primera y más simple corresponde a muescas planas espaciadas simétricamente; mientras que la segunda conocida como muesca en forma de V, es comúnmente utilizada en espesadores de gran dimensión. Además, esta última destaca por ser capaz de evitar tasas de desbordamiento demasiado irregulares, ante la presencia de viento en la superficie de líquido y porque son menos sensibles a desviaciones en el nivel del tanque. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Sistema de descarga del underflow.**

En el fondo del tanque, la cama de sólidos sedimentados debe ser retirada del espesador con la ayuda del giro de las rastras, que facilitan el transporte de la pulpa hacia el centro del tanque. En esta zona se ubica una estructura cónica que conecta con la línea de descarga para eliminar finalmente los sólidos, pudiendo tratarse de una sola cañería o varias de ellas. Para favorecer la descarga de los sólidos desde el fondo del equipo, se pueden utilizar bombas centrífugas, bombas de desplazamiento positivo o simplemente aprovechar el efecto de gravedad, dependiendo de las características de la pulpa obtenida y la disposición geográfica del equipo. (Ojeda Vásquez, 2014)

2.2.5.1.2. Equipos de instrumentación.

Los principales instrumentos con los que se equipa un espesador, están pensados en poder controlarlo a través de la lectura de señales que permitan identificar a tiempo lo que sucede en su interior. El control de cualquier espesador requiere de una combinación de señales confiables y del conocimiento de los fundamentos de operación del equipo. Mientras mayor sea el grupo de equipos de instrumentación disponible, menor será la dificultad para desarrollar una estrategia de control ya sea de forma manual o mediante algún sistema de control automático. (Ojeda Vásquez, 2014)

Entre algunas de las variables que se monitorean comúnmente destacan torque, presión de la cama de lodos, nivel de interfaz, flujos y densidades en la alimentación y en la descarga, entre otras que permitan complementar la información, dependiendo además de los objetivos del equipo o las características de la planta. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Torque.**

El concepto de torque desde un punto de vista práctico en la operación, es una medición en el espesador que se utiliza como un indicador de la fuerza necesaria para hacer girar las rastras. De esta forma, una medición de torque alto puede significar una densidad del underflow muy alta o una cama de lodos muy gruesa. Pese a que ambas son las situaciones más comunes, puede indicar el ingreso de una mayor fracción de material grueso en la alimentación u otros

fenómenos menos frecuentes, los que se podrán identificar con el análisis de las demás señales. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Altura de rastras.**

La medición de altura de rastras está directamente relacionada con el mecanismo de elevación de las mismas. Este sistema, como se detalló en el punto anterior, se utiliza frecuentemente en función de los límites establecidos para la medición de torque, pudiendo permitir que las rastras continúen girando incluso durante condiciones irregulares o bien, para evitar situaciones que pongan en riesgo la estructura. De este modo un indicador de la posición de las rastras, permite al operador conocer la posibilidad de controlar la operación mediante este método, evitando un desgaste innecesario cuando las condiciones permitan ajustar la altura relativa de las rastras, en caso que el equipo haya sido diseñado con este sistema. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Nivel de cama.**

Los instrumentos utilizados para medir la variable conocida como nivel de cama, buscan identificar la altura correspondiente al nivel de sólidos que han sedimentado al interior del equipo, denominada zona de compactación. Esta indicación representa la altura aproximada a la cual se tiene un determinado nivel de sólidos, entendiendo que el fenómeno de sedimentación, genera un perfil de concentración de partículas desde la superficie hasta el fondo del equipo. (Ojeda Vásquez, 2014)

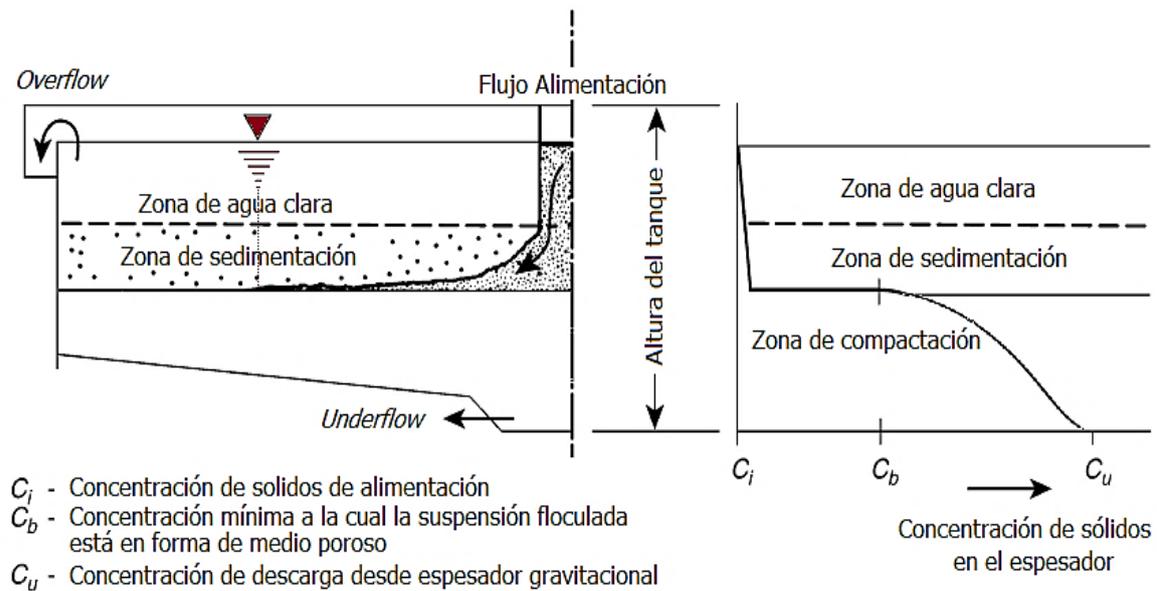


Figura 7. Perfil de concentración de sólidos en un espesador.

En la industria existen variados tipos de instrumentos que permiten determinar el nivel de cama, los cuales funcionan a partir de distintos métodos, cada uno de los cuales poseen sus ventajas y debilidades dependiendo de la aplicación donde se utilice. Entre ellos se pueden mencionar los de tipo ultrasónico, nuclear y por métodos físicos. (Ojeda Vásquez, 2014)

- **Presión de cama de lodos.**

La intención de medir la presión en la zona inferior del tanque del espesador, parte de la premisa que esta medición representa un indicador de la gravedad específica global dentro del equipo, debido al volumen constante en su interior. Además, como la gravedad específica del líquido es prácticamente constante, se puede inferir que la gravedad específica global representa directamente la cantidad de sólidos que hay en el interior del espesador, es decir el inventario de sólidos al momento de la medición. (Ojeda Vásquez, 2014)

Respecto a los instrumentos para medir la presión de la cama de lodos, generalmente se utilizan sensores de presión diferencial, con una conexión al fondo del espesador y la otra abierta a la atmósfera, con el objetivo de compensar eventuales variaciones de presión del ambiente. En el caso de la conexión con el espesador, típicamente se instala de forma inclinada de tal manera de evitar la obstrucción por acumulación de sólidos, haciendo que estos sedimenten lejos del sensor. (Ojeda Vásquez, 2014)

2.2.5.2. Tipos de espesadores.

Manteniendo las características generales de construcción y sus componentes principales, podemos encontrar los siguientes tipos de espesadores: (Anaya Huamán, 2016)

2.2.5.2.1. Espesadores convencionales.

Se caracterizan porque requieren de grandes áreas de terreno dado que su productividad depende sobre todo del área del espesador, en estos equipos el pozo de alimentación (feed well) tiene una profundidad del orden de 1 m. El flujo de alimentación al entrar al espesador se mezcla con un poco de agua recuperada diluyéndola. La pulpa diluida sedimenta a velocidad constante formando deferentes zonas en el espesador: de agua clara, de pulpa de consistencia de alimentación y sedimento. (Anaya Huamán, 2016)



Figura 8. Espesador convencional.

2.2.5.2.2. Espesadores de alta capacidad.

Se caracterizan por que tienen mayor capacidad que los espesadores convencionales, en estos equipos el pozo de alimentación es más profundo que en el espesador convencional, lo que permite la descarga de la pulpa de alimentación bajo el nivel del sedimento, evitando así el contacto directo entre el líquido que asciende y los sólidos que sedimentan. La alimentación entra en el mismo al lugar donde se agrega el floculante y lo dispersa rápidamente, logrando un mezclado gradual en su descenso, con una mejor acción del floculante. Al mezclarse la alimentación con el sedimento forman una pulpa de mayor concentración que la alimentación y, mayor o igual concentración que la concentración crítica (sedimentos entran en compresión). A esto se debe que no exista una zona de sedimentación, la que restringe la capacidad del espesador. (Anaya Huamán, 2016)



Figura 9. Espesador de alta capacidad.

2.2.5.2.3. Espesadores de alta densidad.

Se caracteriza por su altura, corresponde a un espesor de cono profundo o de alta capacidad, pero de mucha mayor altura. La mayor altura genera un aumento de la presión sobre el sedimento, obteniendo como resultado concentraciones de sólido más altas en la descarga. En muchos casos, estos espesadores poseen un cono pequeño de modo de ayudar a evacuar la descarga. (Anaya Huamán, 2016)



Figura 10. Espesador de alta densidad.

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES.

Las definiciones conceptuales se han sido tomadas de las referencias bibliográficas (López Cutipa, 2018) (Anaya Huamán, 2016) (Palli Calla, 2016) (Gómez Paredes, 2012)

- **Actividad.** Proceso o grupo de operaciones que constituyen una unidad cuyo resultado es un conjunto de bienes o servicios. Los bienes y servicios producidos pueden ser característicos de esa u otra actividad.
- **Agitación.** En procesamiento de minerales y metalurgia se refiere a movimiento de un líquido o una pulpa generado por acción neumática o mecánica, algunas veces acompañado por la introducción de aire comprimido.
- **Análisis granulométrico.** Análisis que permite medir la efectividad de las operaciones de conminución de minerales. Consiste en hacer pasar un peso conocido de una muestra a través de una serie de cribas sucesivamente más finas y pesar la cantidad retenida sobre cada una de ellas para determinar el porcentaje de peso en cada fracción de tamaño y su distribución relativa con respecto al peso original.
- **Angulo de deslizamiento.** La pendiente, medida desde la horizontal, en la cual materiales sólidos sueltos o fragmentados comenzarán a deslizarse; es un ángulo un poco mayor que el ángulo de reposo.
- **Angulo de reposo.** El ángulo máximo que forma con la horizontal, al cual un material permanecerá en una superficie, sin deslizarse o rodarse.

- **Densidad.** Peso de una sustancia en gramos por centímetro cúbico (a una temperatura específica). En el caso de líquidos y sólidos, es equivalente a la gravedad específica.
- **Densidad de pulpa.** Se define como la relación entre el peso total de una pulpa (sólido más líquido) y el volumen que ocupa.
- **Clarificador.** Tanque de sedimentación, centrífuga u otro equipo utilizado para separar la materia sólida suspendida a partir de un líquido.
- **Granulometría.** Lo relacionado con la medición del tamaño de las partículas de rocas o sedimentos.
- **Pulpa.** Mezcla de mineral molido o pulverizado con agua o una solución acuosa.
- **Sedimentador.** Tanque redondeado usado en las plantas de tratamiento de minerales para separar sólidos de líquidos.
- **Separación sólido-líquido.** La separación líquido - sólido es la remoción del metal que lleva la solución impregnada del residuo de lixiviado.

2.4. FORMULACION DE HIPOTESIS.

2.4.1. Hipótesis general.

Mediante la optimización de los espesadores se logrará una mejor recuperación de agua de los relaves de hierro y cobre en la empresa minera SHOUXIN.

2.4.2. Hipótesis específicas.

- La caracterización de las propiedades físicas químicas de los relaves determinara una buena optimización durante la recuperación del agua.
- Mediante la determinación del efecto de dosificación de floculante sobre la velocidad de sedimentación se logrará una mejor recuperación del agua.
- La selección de los criterios óptimos permitirá la elección de equipos e instrumentos que ayuden en la eficiencia de separación solido-liquido.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1. DISEÑO METODOLOGICO.

En el presente trabajo se aplica el método de investigación Inductivo-Deductivo, en referencia a los antecedentes de la investigación podemos determinar que el análisis de operación de los espesadores nos permita optimizar los parámetros para una mejor recuperación de agua de los relaves de hierro y cobre tratados en la planta.

3.1.1. Tipo de investigación.

Por la aplicación de teorías y datos actuales obtenidos durante la operación de los espesadores convencionales en la planta de la minera SHOUXIN S.A. el tipo de investigación será básico.

3.1.2. Nivel de Investigación.

El nivel de investigación que se presenta en el trabajo de investigación es descriptivo, en vista que se estudiara el comportamiento y parámetros de los espesadores convencionales en su estado actual y no se alterara en el funcionamiento de los mismos.

Para Herrera, Medina & Naranjo (2010). Las investigaciones descriptivas constituyen el punto de partida de las líneas de investigación, su objetivo es determinar la situación de las variables involucradas en el estudio en un momento dado con relación a su presencia o ausencia, la frecuencia con que se presenta un fenómeno (incidencia o prevalencia), características de las personas, lugar y periodo donde ocurre. El nivel de investigación descrito con anterioridad fue el que se utilizó para el desarrollo, estudio, análisis e investigación del problema planteado ya que este vinculó a todos los actores objetos de estudio.

3.1.3. Diseño de la Investigación.

El diseño de la investigación es descriptivo simple, en referencia que se recabara datos de los espesadores convencionales en el estado de operación en el cual se encuentran. Teniendo como muestra la influencia del espesador convencional y como observación de la muestra la recuperación de agua.

Según Espinoza Montes (2010) , los diseños descriptivos (descriptivo simple) busca recoger información actualizada sobre el objeto de investigación. Sirve para estudios de diagnósticos descriptivo, caracterización, perfiles, etc.

3.2. POBLACION Y MUESTRA.

3.2.1. Población.

La población sobre la cual se basa la investigación está constituida por el objeto de estudio, en este caso son los espesadores convencionales que las cuales cuenta la empresa minera SHOUXIN S.A.

3.2.2. Muestra.

Según Información de Herrera, Medina & Naranjo (2010) la muestra es una parte de la población seleccionada de acuerdo con una regla o plan, debe ser representativa, y además ofrecer la ventaja de ser la más práctica, la más económica y la más eficiente en su aplicación.

La muestra de nuestra investigación se basa en la recuperación de agua mediante el proceso de espesamiento.

3.3. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES E INDICADORES.

Optimización para la Recuperación de Agua a partir de los Relaves de Hierro y Cobre mediante el uso de Espesadores en la Empresa Minera SHOUXIN – 2018.

Tabla 1
Variables e Indicadores.

Variable Independiente	Indicador
Relaves de Hierro y Cobre.	<ul style="list-style-type: none"> - % de sólidos. - Distribución de partícula. - Tamaño y forma de partículas. - pH. - Temperatura de pulpa.
Variable Dependiente	Indicador
Recuperación de agua mediante espesadores.	<ul style="list-style-type: none"> - Dosificación del floculante. - Tiempo de residencia. - Tasa de alimentación. - Dilución de pulpa. - Velocidad de la rastra. - Agua recuperada.

3.4. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS.

De acuerdo con el número de muestras tomas y de los datos obtenidos se elaborará un informe el mismo que debe de cumplir con los parámetros establecidos. La recolección de la información se realizará mediante formatos que se adjuntaran a los informes emitidos para su posterior análisis.

3.4.1. Técnicas a emplear.

La técnica que se utilizara es documental y empírica. Para el caso de la técnica documental se utilizará para la elaboración del marco teórico, la cual nos

ayudará a la recolección de datos, archivos y documentos, los instrumentos que se utilizarán son fichas de observaciones, hojas de reportes y hojas de trabajos.

En relación a la técnica empírica se utilizará para recolectar datos de los espesadores convencionales a través de la observación y medición de los parámetros. Todos ellos permitirán obtener datos de volumen de recuperación de agua, empleando los instrumentos adecuados.

3.4.2. Descripción de los instrumentos.

- Consulta a expertos.
- Revisión de archivos y documentos.
- Revisión de literatura.
- Trabajo de campo.
- Internet.
- Captación de información directa de la fuente
- Informes técnicos.
- Hojas de reporte.
- Fichas de observaciones.
- Normas.
- Escalas libreta de notas.
- Filmadora.
- Cámara fotográfica y grabadora.

3.5. TECNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION

De acuerdo con los datos observados y de los resultados que se obtendrán en las pruebas, su procesamiento se ejecutará:

- De acuerdo con la técnica de ensayo se verificará la validez del formato dispuesto de acuerdo con la norma correspondiente.
- De acuerdo con el propósito específico, estas serán recolectadas y analizadas según el requerimiento previsto.
- Se verificará la correcta disposición de los puntos de toma de muestra y los instrumentos y aparatos requeridos.
- Se llevará por escrito, un control de las observaciones, en el formato referido para prueba realizada, incluyendo fotografías si así se requiere y detalles específicos.
- De acuerdo a los informes, estos serán analizados e interpretados de acuerdo con los requerimientos bajo su respectiva normalización.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. PROCEDIMIENTOS REALIZADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN

El conocimiento de las propiedades físico químico de los relaves a tratar es fundamental para poder realizar una buena optimización de los espesadores para la recuperación de agua a partir de los relaves mineros a tratar.

Mediante ensayos y pruebas realizado en el laboratorio se determinó la caracterización de los relaves de hierro y cobre tratados en el área de espesadores. Los parámetros a determinar fueron las siguientes.

- Tipo de floculante.
- Dosificación de floculante.
- Viscosidad.
- Resistencia a la fluencia.
- Densidad.
- Porcentaje de sólidos.

4.1.1. Características del relave.

Los relaves provienen de las operaciones de la planta de concentración de la minera SHOUGANG, y de las canchas de relave pasivos con las que se cuentan.

Tabla 2
Análisis granulométrico de la muestra general

Alimento General / Muestra: 200 gr.				
N° de malla	Peso (gr.)	% Peso	Acum. (+)	Acum. (-)
70	29.36	14.68	14.68	85.32
100	21.14	10.57	25.25	74.75
140	20.35	10.18	35.43	64.58
200	18.49	9.25	44.67	55.33
270	15.74	7.87	52.54	47.46
325	5.98	2.99	55.53	44.47
400	5.13	2.57	58.10	41.91
-400	83.81	41.91	100.00	---
Total	200.00	100.00		

Tabla 3
Análisis granulométrico de la muestra alimentada la filtro

Muestra Alimentación al Filtro: 200 gr.				
N° de malla	Peso (gr.)	% Peso	Acum. (+)	Acum. (-)
70	45.68	22.84	22.84	77.16
100	16.20	8.10	30.94	69.06
140	24.35	12.18	43.12	56.89
200	15.23	7.62	50.73	49.27
270	15.52	7.76	58.49	41.51
325	5.11	2.56	61.05	38.96
400	2.93	1.47	62.51	37.49
-400	74.98	37.49	100.00	---
Total	200.00	100.00		

Tabla 4
Característica metalúrgica del relave

Parámetros	Valor
Gravedad específica del sólido	2.73
Gravedad específica del líquido	1
Temperatura	16 °C
pH	11.1
d80	420 μm
d50	40 μm

4.1.2. Selección del floculante.

El determinar la velocidad de sedimentación de los distintos tipos de floculantes usados para las pruebas, sobre la muestra de relave a estudiar nos permite seleccionar el polímero más óptimo que se debe de usar para una mejor recuperación del agua contenido en los relaves tratados en los espesadores de la planta.

Las condiciones que presenta la pulpa del relave y la cantidad de dosificación del floculante como también otras condiciones que presentan, se mantienen constantes, con la finalidad de poder comparar el comportamiento de los distintos tipos de floculantes estudiados.

Tabla 5
Característica de la pulpa del relave

Densidad de pulpa	1183 g/l
% de solidos	24.01 %
Gravedad especifica	2.73 g/cc
Dosis de floculante	12 g/T
d80	420 μ m
d50	40 μ m

Los distintos tipos de floculantes que se usaron para la investigación fueron los siguientes:

- Floerger PHP20.
- Floerger PHP30.
- Praestrol 2530.
- Magnafloc 351.
- Orifloc 2052.

Se realizaron seis pruebas, cada uno con un tipo distinto de floculante; siguiendo los siguientes pasos, para cada prueba:

- Preparación de los floculantes a una concentración de 0.02%.
- Preparación de la pulpa a 8%w de sólidos.
- Homogenización de la pulpa asegurando la suspensión total de las partículas contenidas en ella.
- Registro de la altura de interfase presente en la muestra (cada 5 segundos en un total de 1 minuto), durante el proceso de sedimentación.

- Representación de los valores de altura y tiempo en gráficas, para determinar su tendencia.
- Las pruebas se realizan a todas las muestras en estudio.

Tabla 6
Resultados de la selección de floculante

Parámetros Medidos	Floculantes				
	PHP20	PHP30	2530	351	2052
Gravedad especifica del solido	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73
Gravedad especifica del solido	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Gravedad especifica de la pulpa	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Masa del solido (gr.)	84.90	85.10	84.70	84.90	84.90
Masa del líquido (gr.)	968.90	968.80	969.00	968.90	968.90
Masa de la pulpa (gr.)	1023.80	1053.90	1053.70	1053.80	1053.80
Volumen del solido (ml.)	31.10	31.20	31.00	31.10	31.10
Volumen del líquido (ml.)	968.90	968.80	969.00	968.90	968.90
Volumen de la pulpa (ml.)	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
Floculante (ml.)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Concentración floculante (g/l)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Dosificación g/t	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

Tabla 7
Resultados de la sedimentación

Tiempo	Floculantes				
	PHP20	PHP30	2530	351	2052
0	360.5	360.5	360.5	360.5	360.5
1	335.5	330.5	360.5	360.0	360.0
2	314.5	309.5	360.0	359.0	359.0
3	299.5	294.5	359.5	358.5	358.5
4	287.0	285.0	359.0	358.0	358.0
5	277.5	277.0	357.5	357.5	357.0
8	262.0	263.5	355.5	356.5	356.0
10	254.5	257.5	353.5	354.5	354.0
15	241.5	246.5	348.5	348.5	350.0
20	233.5	238.5	344.5	340.5	345.0
30	221.5	228.5	319.5	324.5	336.0
60	204.5	211.0	254.5	268.0	310.0
90	195.5	201.5	238.5	250.5	280.0
120	189.0	195.0	229.5	240.5	250.0

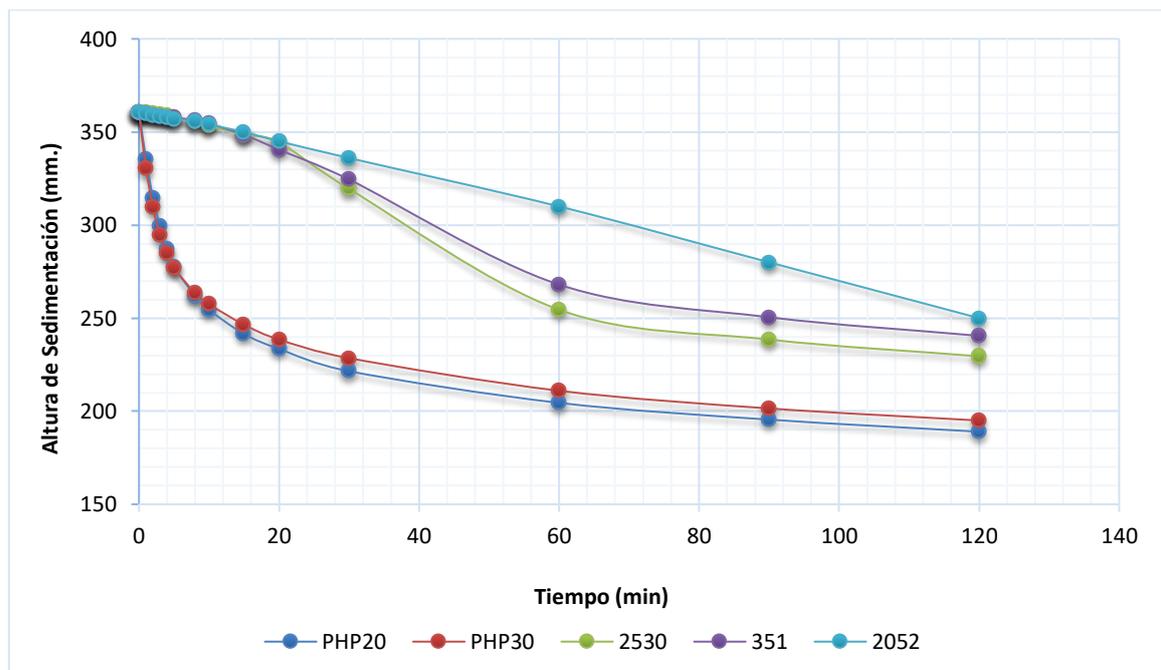


Figura 11. Velocidad de sedimentación de los floculantes.

De los floculantes ensayados, el que presenta mayor velocidad de sedimentación como se puede observar en la gráfica anterior es el PHP20. También se puede observar que el floculante PHP30 presenta una velocidad de sedimentación muy próxima al floculante PHP20.

4.1.3. Dosificación y concentración del floculante.

Con la finalidad de determinar la dosis mínima de floculante y obtener resultados favorables sin afectar los costos de operación; la determinación de la dosificación se obtiene mediante la determinación de la tasa de alimentación de una muestra de pulpa a diferente porcentaje de dosificación con el mismo floculante seleccionado.

Tabla 8
Dosificaciones del floculante seleccionado

Tiempo	Floculante PHP30		
	70 g/T	80 g/T	90 g/T
0.0	357.0	357.0	357.0
0.5	333.5	328.0	260.0
1.0	311.5	300.0	235.0
1.5	287.5	275.0	224.0
2.0	268.5	261.0	216.0
3.0	250.5	246.0	207.0
4.0	240.5	235.5	202.0
6.0	228.0	223.5	195.0
10.0	210.0	211.0	186.0
15.0	205.0	199.5	180.0
20.0	199.0	194.0	175.0
30.0	190.0	182.3	169.0
60.0	169.0	175.0	159.0

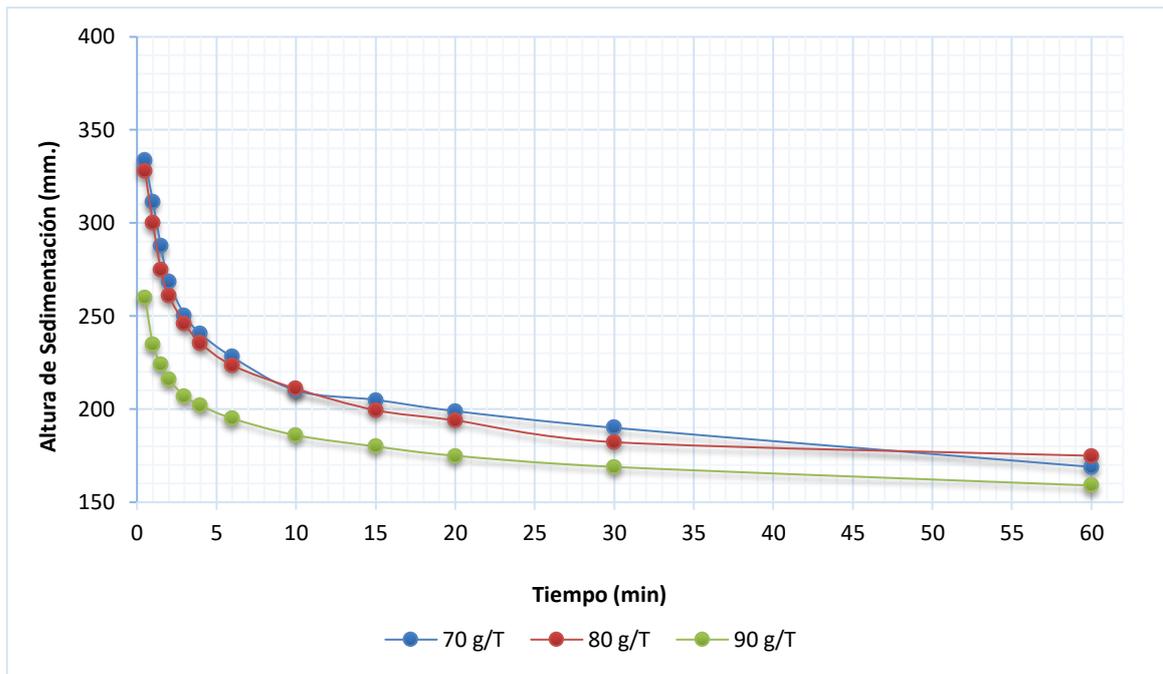


Figura 12. Velocidad de sedimentación del floculante PHP30.

Se puede observar el descenso de la curva que presenta la dosificación de 90 g/T en función del tiempo ensayado; a la vez se puede terminar que este sería la dosificación ideal del floculante para poder insertarlo durante las operaciones de los espesadores en el tratamiento de los relaves.

4.1.4. Determinación de la concentración de sólidos.

Es esencial conocer la concentración máxima que se puede obtener de la pulpa de relave, lo cual delimitará los niveles máximos esperados de concentración de sólidos en un espesador industrial.

La prueba consiste en permitir la sedimentación floculada en probetas de dos litros de capacidad durante un periodo mínimo de 24 horas.

Para la obtención de las densidades terminales se empleó una mayor dosificación de floculante de 12 g/t, de tal manera de obtener una compactación forzada de la muestra. En compactación forzada las concentraciones máximas logradas fueron de 85%w para 50%w de sólidos en la alimentación.

4.1.5. Porcentajes de sólidos.

De los resultados obtenidos y tomando en consideración la limitación de porcentaje de sólidos para que sea manejable por las bombas centrifugas, los resultados indican que una descarga de 66%w demuestra valores óptimos de resistencia a la fluencia y a la vez maximiza la recuperación de agua.

Tabla 9
Resistencia a la fluencia vs porcentaje de solidos

%w	Resistencia a la fluencia (Pa)	
	No cizallado	Cizallado
74.0	650.0	321.0
71.4	260.0	189.0
69.0	215.0	110.0
68.0	130.0	88.0
67.5	115.0	62.0
65.0	90.0	50.0
64.0	74.0	42.0
63.0	68.0	37.0
62.1	54.0	25.7
59.6	47.4	28.1
58.0	31.0	20.6
46.7	20.0	17.8
54.2	12.0	8.0
51.4	10.0	10.0

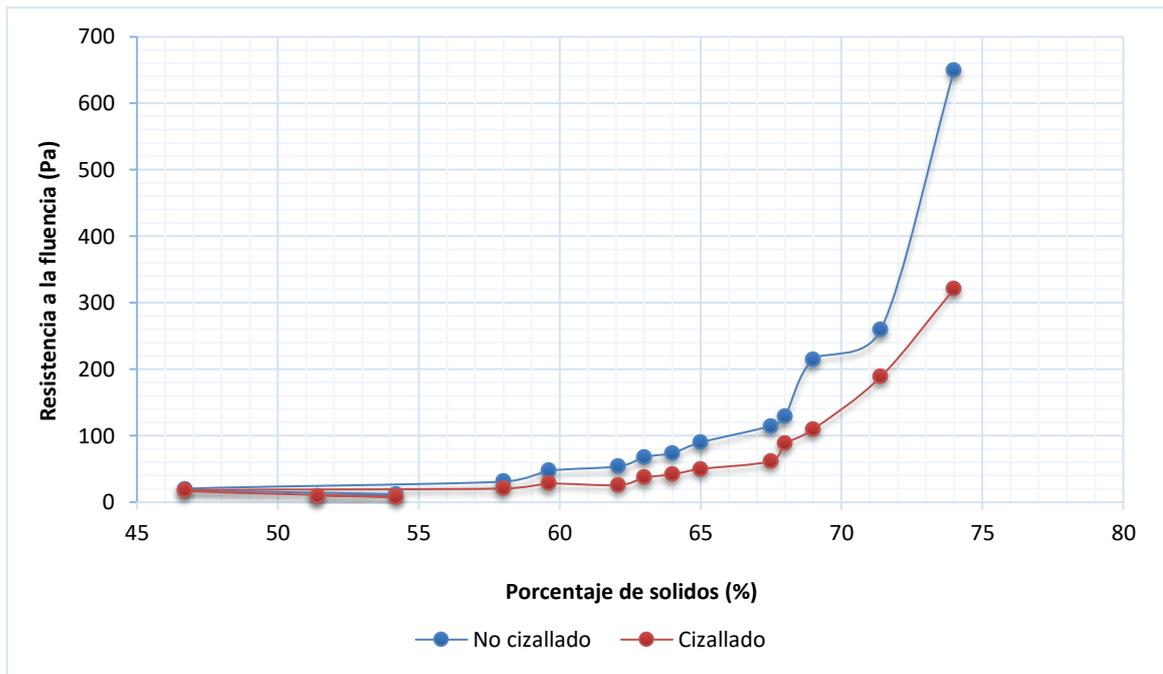


Figura 13. Resistencia a la fluencia vs porcentaje de solidos de los relaves.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos se puede determinar que es factible optimizar la recuperación de agua contenida en los relaves mediante la dosificación correcta de floculante en los espesadores.

- De los cinco floculantes que se han sido materia de estudios para determinar la velocidad optima de sedimentación y una mejor recuperación del agua contenido en los relaves, el que presento mejor comportamiento es el Floculante Floerger PHP 30.

- En una dosificación de 90 gr./t se obtuvo una clarificación con presencia de sólidos y compactación del relave en relación de las otras cantidades de floculantes estudiados.

- Los resultados de la prueba de sedimentación con floculante realizadas a los relaves de hierro y cobre se trabajaron sin diluir la pulpa, en estas pruebas traro de determinar la dosificación adecuada para encontrar las condiciones necesarias para una mejor recuperación del agua. Si bien se obtiene a 90 gr./t una buena velocidad de sedimentación, se debe hacer pruebas complementarias con dilución de pulpa.

- Se asume que a esta dosis el PHP 30 presenta un mejor comportamiento en la velocidad de sedimentación, floculación aceptable, buena clarificación en el OVER FLOW y compactación de sólidos aceptable en el UNDER FLOW; el cual se considera óptimo para la operación del espesador sin dilución de la pulpa de relave.

5.2. RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar distintas pruebas de velocidad de sedimentación de los sólidos contenidos en los relaves con otros tipos de floculantes comerciales, disminuyendo el consumo del mismo.
- Las empresas mineras durante sus operaciones deben de tener en cuenta y seleccionar el método óptimo para la recuperación de la mayor cantidad de agua contenidas en los relaves mineros que generan de sus actividades.
- Buscar a la vez alternativas tecnológicas para la recuperación y tratamiento de aguas mineras.
- Buscar alternativas a los floculantes, para poder lograr agua más purificada durante su recuperación.

CAPÍTULO VI

FUENTES DE INFORMACION

5.1. FUENTES BIBLIOGRAFICAS.

Anaya Huamán, R. (2016). *Estudio de la Influencia del Espesador de Cono Profundo, para la Recuperación de Agua en la Compañía Minera Volcan S.A.* Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

Cabrejos Salinas, J. (2011). *Estudio de Pre-Factibilidad para la Recuperacion de agua a partir de Relaves de Gran Minería de Cobre mediante la Tecnología de Relaves Pesados.* Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Cupita Gonzales, R. (2017). *Automatización de un Sistema de Recuperación de Agua de Relave.* Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

Espinoza Montes, C. (2010). *Metodología de investigación Tecnológica. Pensando en Sistemas.* Huancayo, Perú: Imagen Gráfica SAC.

Gómez Paredes, P. (2012). *Evaluacion Pruebas de Espesamiento de Relaves en Planta Piloto.* Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

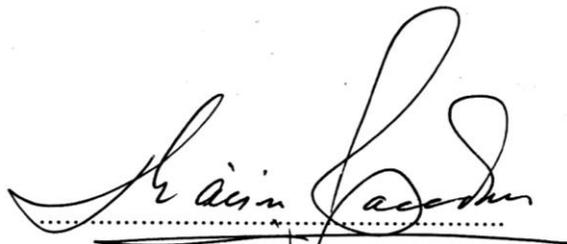
Herrera, L., Medina, A., & Naranjo, G. (2010). *Tutoria de la Investigación Científica*. Ambato, Ecuador: Grafica Corona Quito.

López Cutipa, J. (2018). *Diseño de un Sistema Experto para Optimizar la Operación de los Espesadores de Relaves de Alta Capacidad en una Planta Concentradora de Cobre*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

Ojeda Vásquez, P. (2014). *Diseño e Implementación Lógica de Control Experto en Espesador de Relaves - Planta las Tórtolas*. Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Palli Calla, R. (2016). *Dimensionamiento y Optimización de un Sedimentador Convencional de Relaves de Cobre en una Planta de Procesamiento de 850 TMD*. Tesis de Pregrado, Universidad de San Agustín, Arequipa, Perú.

**OPTIMIZACION PARA LA RECUPERACION DE AGUA A PARTIR
DE LOS RELAVES DE HIERRO Y COBRE MEDIANTE EL USO
DE ESPESADORES EN LA EMPRESA MINERA SHOUXIN - 2018**



Dr. SALCEDO MEZA, MAXIMO TOMAS

Presidente



Dr. NUNJA GARCÍA JOSÈ VICENTE

Secretario



M(o). ABARCA RODRIGUEZ, JOAQUIN JOSÉ.

Vocal



M(o) NATIVIDAD HUASUPOMA, DELICIAS EUFEMIA

Asesor