UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE ADICIÓN DE REACTIVO PARA TRATAMIENTO DE RELAVE

Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en MINERÍA Y METALURGIA.

Alumno:
Bárbara Romina Fuentes Vásquez

Profesor Guía:
Ing. Luis Augusto Gutiérrez Meneses

2018

A mis Padres, María Vásquez y Patricio Fuentes, quienes con tanto esfuerzo apoyaron mi día a día para lograr mis metas, estaré eternamente agradecida y recordaré con cariño las experiencias que viví.

RESUMEN

KEYWORDS: Relave, Depósito, Carbonato de calcio, Cal viva, pH.

El tema desarrollado en el siguiente trabajo de título se basa en la idea de que el reactivo más utilizado en el tratamiento de los relaves en Chile es la cal viva, ya que el calcio es un elemento activo que consume el ácido, neutralizando soluciones de pH elevado. Esto nos permite atribuir el mismo efecto al carbonato de calcio en bruto (ya que en su mayoría contiene calcio) para el tratamiento de relaves.

Para esto se comparan la norma de suelos que nos indica el contenido de metales en la tierra y la norma de aguas de riego, para visualizar los rangos que se pueden adicionar de metales extra al terreno, y a partir de esto, saber cuan afectados se ven los parámetros de elementos metálicos al filtrarse el contenido de los depósitos y tranques de relave en el ambiente.

Es importante caracterizar la pulpa de relave, que según lo dispuesto por el Sernageomin contiene al menos nueve elementos, al igual que iones sulfatos y cianuro, también es de suma importancia la forma en la que se construyen las diferentes estructuras para la contención de estos residuos mineros como lo serían los depósitos, embalses y tranques.

Dicho lo anterior, para contemplar un cambio en el pH de un relave volviéndolo inocuo, es decir, inofensivo ante una filtración o derrame, se propone la adición del carbonato de calcio en bruto, en su forma de roca mineralizada, pasada por chancador como principal método de conminución.

Formulando un trabajo experimental, que consiste en llevar los carbonatos de calcio extraídos de la Mina Blanco 3 en forma de roca al chancador del laboratorio, para conminuir el material y así poder adicionarlo de manera uniforme a la pulpa de relave proporcionada por la Minera Migrin; realizando pruebas separadas con carbonato de calcio en bruto de alta, media y baja pureza según su color, en vasos precipitados con relave.

En contraste se lleva a cabo otra prueba con cal viva (carbonato de calcio pasado por hornos de calcinación) y se comparan los resultados, tomando en cuenta el tiempo que demora en actuar y la cantidad de reactivo modificador utilizado en cada caso.

ÍNDICE

RESUMEN 3

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA 8

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVOS 3

OBJETIVO GENERAL 3

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES 1

1. ANTECEDENTES GENERALES 5

1.1. DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE 6

1.1.1. Estadística por regiones 6

1.2. TIPOS DE DEPÓSITOS DE RELAVES 8

1.2.1. Depósitos Superficiales 8

1.2.2. Depósitos Subterráneos 8

1.2.3. Depósitos de relaves (Tranque de relaves) 9

1.2.4. Depósitos de relaves: (Embalse de relaves) 9

1.2.5. Depósito de relave espesado 10

1.2.6. Depósito de relave en pasta 11

1.2.7. Depósito de Relaves Filtrados 12

1.2.8. Depósitos en Minas Subterráneas en Operación 13

1.2.9. Depósitos en Minas Subterráneas Abandonadas 13

1.2.10. Depósitos de Relave inocuo 14

1.3. REQUISITOS DE UN DEPÓSITO DE RELAVES: 15

1.4. PARTES GENERALES DE UN DEPÓSITO DE RELAVE 16

1.5. EL PASO A PASO PARA LLEGAR A PRODUCIR RELAVE 20

1.5.1. Procesos para la extracción del cobre oxidado 21

1.5.2. Procesos para la extracción del cobre sulfurado 21

1.5.3. Proceso Productivo de la Cal 25

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE CONTENIDO

2. DESARROLLO DE CONTENIDO 34

2.1. NORMATIVA DE RELAVES 34

2.2. DEPÓSITOS DE RELAVE Y MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN 39

2.2.1. Método Aguas Arriba 39

2.2.2. Método Aguas Abajo 40

2.2.3. Método Eje Central o Mixto 41

CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN BASE. 34

3. EXPERIMENTACIÓN BASE. 52

3.1. MEDICIONES EXPERIMENTALES 52

3.1.1. Importancia ecológica 53

3.1.2. Materiales utilizados en el laboratorio 54

3.2. PROCEDIMIENTO DE LA EXPERIMENTACIÓN 55

3.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN 56

3.3.1. Experimento 1 56

3.3.2. Experimento 2 57

3.3.3. Experimento 3 57

3.3.4. Experimento 4 57

3.4. PENDIENTE DE DEPOSITACIÓN DEL RELAVE 60

3.5. GEOQUÍMICA DE DEPÓSITOS DE RELAVES 61

3.6. RIESGO DE COLAPSO 64

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 65

BIBLIOGRAFÍA 67

ANEXOS 69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Diagrama de flujos de residuos creados por procesos minero-metalúrgicos 5
Figura 1-2. Tranque de relaves el Mauro, con separación de aguas claras - lamas 9
Figura 1-3. Embalse Enami Vallenar 10
Figura 1-4. Depósito de relave espesado Collahuasi 11
Figura 1-5. Depósito de Relave en pasta 12
Figura 1-6. Depósito de relave filtrado 12
Figura 1-7. Proyecto depositación de relave, interior mina sauce, relleno de caserones con relave espesado e impulsado por tuberías, Minera Las Cenizas, Cabildo 13
Figura 1-8. Depósito de relave en mina subterránea abandonada 14
Figura 1-9. Partes de un Depósito de Relaves en general 17
Figura 1-10. Bioacumulación de especies metálicas 19
Figura 1-11. Explotación y barrenación de caliza 26
Figura 1-12. Carga y acarreo de caliza 26
Figura 1-13. Trituración 27
Figura 1-14. Calcinación de caliza en horno Maerz / Rotatorio 27
Figura 1-15. Óxido de Calcio (CaO) 28
Figura 1-16. Óxido de Calcio 28
Figura 1-17. Cal Metalúrgica 30
Figura 1-18. Cal hidratada 30
Figura 1-19. Entrada de la mina de carbonato de calcio Blanco 3, propiedad Enami 31
Figura 2-1. Escala del pH 36
Figura 2-2. Método de aguas arriba 40
Figura 2-3. Método de aguas abajo (capas de arena inclinados) 41
Figura 2-4. Método eje central 42
Figura 2-5. Distribuciones granulométricas típicas de relave de Cobre 42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Catastro diciembre de 2016, Depósitos de relaves en Chile 6
Tabla 1-2. Detalle por región de tipos de relaves empleados 6
Tabla 1-3. Reactivos utilizados en plantas concentradoras de minerales por flotación 24
Tabla 2-1. Características de las aguas residuales de circuitos de flotación de minerales 35
Tabla 2-2. Pendiente límite que admite una pulpa según su concentración de sólidos 38

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1. pH, dónde, [H3O+] (Concentración del ión hidronio en moles/L) 52
Ecuación 3-2. Balance de reacción de la molécula H en presencia de agua 52
Ecuación 3-3. Cálculo de concentración de sólidos en relave 58

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: CERTIFICADO DE MINERA MIGRIN 70
ANEXO B: FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO 71

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

AG	Autógeno.
SAG	Semiautógeno.
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería.
ENAMI	Empresa Nacional de Minería.
SA	Sólidos – Agua.
RIL	Residuo Industrial Líquido.
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

B. SIMBOLOGÍA

[ton]	Tonelada.
[m]	Metro.
[m^2]	Metro cuadrado.
[m^3]	Metro cubico.
[cm]	Centímetro.
[min]	Minuto.
[s]	Segundo.
[h]	Hora.
[km]	Kilómetro.
[kg]	Kilógramos.
%	Porcentaje.
$	Peso chileno.

INTRODUCCIÓN

KEYWORDS: Relave, Depósito, Carbonato de calcio, Cal viva, pH.

Los ciclos mineros o etapas para la producción de metales puros tienen muchas similitudes, sin embargo, cada mineral tiene un proceso diferente de extracción, procesamiento y purificación.

En Chile la mayoría de los ciclos mineros son de cobre y sus derivados, pero además del cobre se extraen y procesan zinc, plata, oro, hierro, manganeso, molibdeno, cadmio, cromo, níquel, galio, telurio, cobalto y antimonio.

Todos los metales se extraen de la roca y pasan por procesos de reducción de tamaño del material, sin embargo, por su naturaleza química, se deben utilizar diferentes solventes y técnicas de obtención.

En este caso, utilizaremos el proceso del cobre como guía. Las partículas de mineral útil del cobre sulfurado se extraen por flotación, que es un proceso fisicoquímico que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre y otros elementos como el molibdeno, del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original.

La flotación se realiza con pulpa proveniente de la molienda, que tiene ya incorporados los reactivos necesarios para la flotación, se introduce en unos receptáculos, llamados celdas de flotación. Desde el fondo de las celdas, se hace burbujear aire y se mantiene la mezcla en constante agitación, para que el proceso sea intensivo.

Los reactivos que se incorporan en la molienda tienen diferentes funciones como, por ejemplo, los reactivos espumantes, que tienen como objetivo el producir burbujas resistentes para llevar las partículas de mineral útil por adherencia hasta la superficie.

Los reactivos colectores, tienen la misión de impregnar las partículas de sulfuros de cobre para que se separe del agua (efecto hidrofóbico) y se pegue en las burbujas; reactivos depresores, destinados a provocar el efecto inverso al de los

colectores para evitar la recuperación de otros minerales como la pirita, que es un sulfuro que no tiene ningún valor comercial; modificadores de pH que sirven para estabilizar la acidez de la pulpa, proporcionando el ambiente adecuado para que el proceso de flotación se desarrolle con eficiencia.

Las burbujas arrastran consigo los minerales sulfurados hacia la superficie, donde rebasan por el borde de la celda, hacia canaletas que las conducen a estanques especiales, desde donde esta pulpa es enviada a la siguiente etapa.

De allí, se recupera el metal útil principal, que es el cobre y los residuos son llevados por una gran canaleta hacia el tranque respectivo, para la depositación segura del relave generado por el proceso productivo, finalizando con el proceso de fundición del cobre obtenido y refinándolo para ser comercializado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer la adición de Carbonato de Calcio como regulador de pH en relave extraído de Minera Migrin, mediante pruebas de laboratorio en las dependencias de la Universidad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Reconocer los tipos de relave según su depositación, mediante información dictada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

2. Diferenciar las partes de un depósito de relave, aspectos regulatorios y disposición de sus aguas según la Normativa de Seguridad Minera.

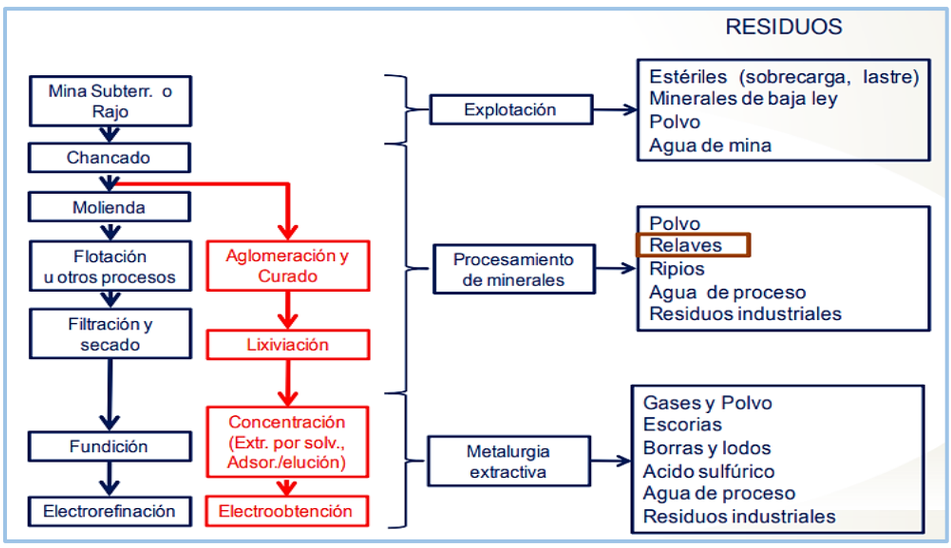
3. Establecer el efecto de la cal v/s carbonato de calcio, como modificador de pH en relave, por medio de pruebas en laboratorio en la Utfsm.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1. ANTECEDENTES GENERALES

El origen de los depósitos de residuos masivos mineros se debe a la necesidad de la depositación segura de los compuestos de procesos de la actividad minero-metalúrgica.

Por ejemplo, los botaderos de estériles, minerales de baja ley y los desmontes mineros, son producidos por la extracción minera; los depósitos de ripios de lixiviación, se generan producto de las pilas de lixiviación y otros tipos de lixiviación; las escorias por las fundiciones y los depósitos de relaves de las plantas de flotación (Ver fig. 1-1).



Fuente: Palma, J. Agosto 2016, Operación y control de tranques de relave, Seminario Minería Chilena y sus Desafíos: una visión integral, Universidad Católica de Chile

Figura 1-1. Diagrama de flujos de residuos creados por procesos minero-metalúrgicos.

Un depósito de relave es una obra que se construye para contener en forma segura los relaves provenientes de una planta de tratamiento o beneficio de minerales por flotación, para recuperar metales con valor comercial, disponiendo los residuos que pueden ser a futuro potenciales contaminantes.

El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), a través del Departamento de Depósitos de Relaves, colabora en la implementación de la normativa vigente sobre depósitos de relaves, en relación con las obligaciones del Decreto

Supremo 248 del Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves, para regular estas estructuras.

Este Departamento genera y actualiza información para el Catastro Nacional de depósitos de relaves activos e inactivos, Atlas virtual y Registro Geoquímico de depósitos. (Ver tabla 1-1 y 1-2)

1.1. DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE

Tabla 1-1. Catastro diciembre de 2016, Depósitos de relaves en Chile.

REGION	ABANDONADO	ACTIVO	NO ACTIVO	Total general
I	6	1		**7**
II	11	12	20	**43**
III	22	28	105	**155**
IV	97	39	232	**368**
RM	4	6	14	**24**
V	8	18	47	**73**
VI		4	14	**18**
VII		2	1	**3**
XI		2	3	**5**
Total general	148	112	436	**696**

Fuente: Falcón, M. Junio 2017, Departamento de Depósitos de Relave, Sernageomin.

1.1.1. Estadística por regiones

Tabla 1-2. Detalle por región de tipos de relaves empleados.

REGION	EMBALSE	EN PASTA	EPV (tranques o acopios antiguos)	ESPESADO	FILTRADO	PRETILES DE RELAVE	TRANQUE DE RELAVE	Total general
I	1						6	**7**
II	9			4	3		27	**43**
III	27	1			2	1	124	**155**
IV	34	1	8		1		324	**368**
RM	4	1					19	**24**
V	19	1					53	**73**
VI	9						9	**18**
VII	2						1	**3**
XI					1		4	**5**
Total general	105	4	8	4	7	1	567	**696**

Fuente: Falcón, M. Junio 2017, Departamento de Depósitos de Relave, Sernageomin

Para contextualizarnos en el primer capítulo de este trabajo, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

Rodrigo Álvarez, director nacional del Servicio Nacional de Geología y Minería, Sernageomin, afirma que el relave corresponde a un conjunto de desechos tóxicos de procesos mineros de la concentración de minerales, usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga (o sin valor comercial), aunque también se encuentran bajas concentraciones de metales pesados, tales como, cobre, plomo, mercurio y metaloides como el arsénico.

La tabla periódica posee unos 70 elementos metálicos de los cuales 59 son considerados metales pesados. Se considera metal pesado, todo elemento de la tabla periódica que sea metálico y tenga peso atómico superior al del hierro de 55,85 g/mol.

Asimismo, contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en tranques o depósitos de relaves, donde lentamente los contaminantes van decantando en el fondo, el agua es recuperada mayoritariamente, y otra parte se evapora. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos.

De acuerdo con la información del Sernageomin, hoy se producen 1.400.000 ton/día de relaves, lo que implica que cada 36 horas se depositan en el país el equivalente a un cerro Santa Lucía de estos residuos.

Para 2035 se estima que Chile estaría produciendo alrededor de ocho millones de toneladas métricas de cobre, duplicando la generación de relaves en ese tiempo.

Las regiones donde se localizarán los nuevos proyectos mineros, según la cartera de inversiones elaborada por Cochilco son principalmente Antofagasta, Atacama, Tarapacá, Coquimbo, Valparaíso y O’Higgins, y todos ellos deberán incluir en sus planes de cierre, la valorización de tecnologías que serán utilizadas para el proceso de cierre total o parcial de las actividades, incluyendo el tratamiento de sus depósitos de relave.

La Ley 20.551, que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras, obliga a todas las empresas a valorizar un plan de cierre aprobado por el SERNAGEOMIN.

El objeto de dicho plan es la integración y ejecución del conjunto de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos que se derivan del desarrollo de la industria extractiva, en los lugares en que ésta se realice, de forma de asegurar la estabilidad física y química de los mismos, en conformidad con la normativa ambiental aplicable.

[Artículo elaborado por Claudia Ortiz C., ‘’ Manejo de impactos ambientales generados por la minería’’, Facultad de Química y Biología, Universidad de Santiago de Chile, Publicado el 13 de diciembre del 2017, Revista de minería chilena] [Recuperado de: http://www.mch.cl/reportajes/manejo-impactos-ambientales-generados-la-mineria/#]

Actualmente, existen varios tipos de depósitos de relaves, que varían según la cantidad de agua que acompaña al relave (es decir, la densidad de este), y según la forma de contener o depositación de este.

1.2. TIPOS DE DEPÓSITOS DE RELAVES

Los relaves en Chile se disponen en diferentes Depósitos dependiendo de su locación.

1.2.1. Depósitos Superficiales

- Tranques de relaves (con Muro de Arenas del Relave)
- Embalses de relaves (con Muro de Empréstito y piscinas)
- Depósitos de Relaves Espesados.
- Depósitos de Relaves en Pasta.
- Depósito de Relaves Filtrados.

1.2.2. Depósitos Subterráneos

- Depósitos en Minas Subterráneas en Operación.
- Depósitos en Minas Subterráneas Abandonadas.
- Depósito de Relave inocuo.

1.2.3. Depósitos de relaves (Tranque de relaves)

Depósito de relaves (Ver Figura 1-2.) donde el muro de contención es construido con la fracción más gruesa del relave (arenas), y una cubeta o volumen físico donde se depositan los sólidos finos del relave (Lamas), los cuales sedimentan y en la superficie se forma una laguna de aguas claras.

Fuente: Falcón, M. Junio 2017, Departamento de Depósitos de Relave, Sernageomin

Figura 1-2. Tranque de relaves el Mauro, con separación de aguas claras - lamas.

1.2.4. Depósitos de relaves: (Embalse de relaves)

Un embalse (Ver Figura 1-3.) es donde el muro de contención está construido con material de empréstito (tierra y rocas aledañas) y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno.

Los relaves se depositan completos en la cubeta sin necesidad de clasificación, pero también deben disponer de un sistema de evacuación de las aguas claras de la laguna que se forma.

También corresponden a aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere la construcción de un muro de contención.

Fuente: Falcón, M. Junio 2017, Departamento de Depósitos de Relave, Sernageomin

Figura 1-3. Embalse Enami Vallenar.

1.2.5. Depósito de relave espesado

Son relaves a los cuales se les remueven gran parte del agua, mediante el uso de espesadores para obtener una concentración de sólidos con valores entre 65 o 75%.

Con esa concentración de sólidos, el relave no se segrega y el depósito se hace homogéneo. Se pueden disponer en pendiente y permiten minimizar o eliminar el requerimiento de muros de confinamiento y de lagunas de decantación.

El depósito de relave espesado se construye de forma tal que impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del sitio autorizado, y debe contar con un sistema de piscinas de recuperación de agua remanente, que pudiese fluir fuera del depósito.

El agua remanente se seca por evaporación y se alcanza el límite de contracción, lo que representa un estado geotécnico denso, no licuable y sísmicamente estable. (Ver fig. 1-4)

Fuente: Falcón, M. Junio 2017, Departamento de Depósitos de Relave, Sernageomin.

Figura 1-4. Depósito de relave espesado Collahuasi.

1.2.6. Depósito de relave en pasta

Los relaves en pasta presentan mejor uso del agua, puesto que hacen un menor desperdicio del recurso hídrico al momento de disponer sus residuos y con ello obtienen depósitos de un menor tamaño, (en comparación con los relaves convencionales que ocupan un mayor espacio físico).

Los aspectos claves que determinan la aplicación de esta tecnología son la definición del nivel de espesamiento, (tecnología de espesadores) y la solución al transporte de los relaves espesados a un nivel de pasta.

La depositación de relaves de alta densidad, o relaves tipo pasta, corresponde a un material altamente desaguado, por medio de espesadores tipo cono profundo o espesadores de alta densidad, con altura de cama profunda.

Esta tecnología permite llevar a cabo una separación sólido-líquido que recupera una importante cantidad de agua y obtiene un producto sólido de alta densidad/viscosidad, el cual debe ser transportado con apoyo de bombeo.

La alta densidad del relave en pasta permite aumentar la vida útil de la capacidad del sitio de depositación de los relaves y generar zonas de depositación tipo cono con pendiente, así se previene el esparcimiento de las impurezas a otros sectores del medio.

Fuente: Minera Las Cenizas, Agosto 2006, Los Relaves, Gerencia Operaciones Cabildo

Figura 1-5. Depósito de Relave en pasta

1.2.7. Depósito de Relaves Filtrados

Es similar al espesado, se trata de un depósito en que el material contiene aún menos agua, gracias al proceso de filtrado, para asegurar así una humedad menor a 20%. Esta filtración es también similar a la utilizada en el agua potable.

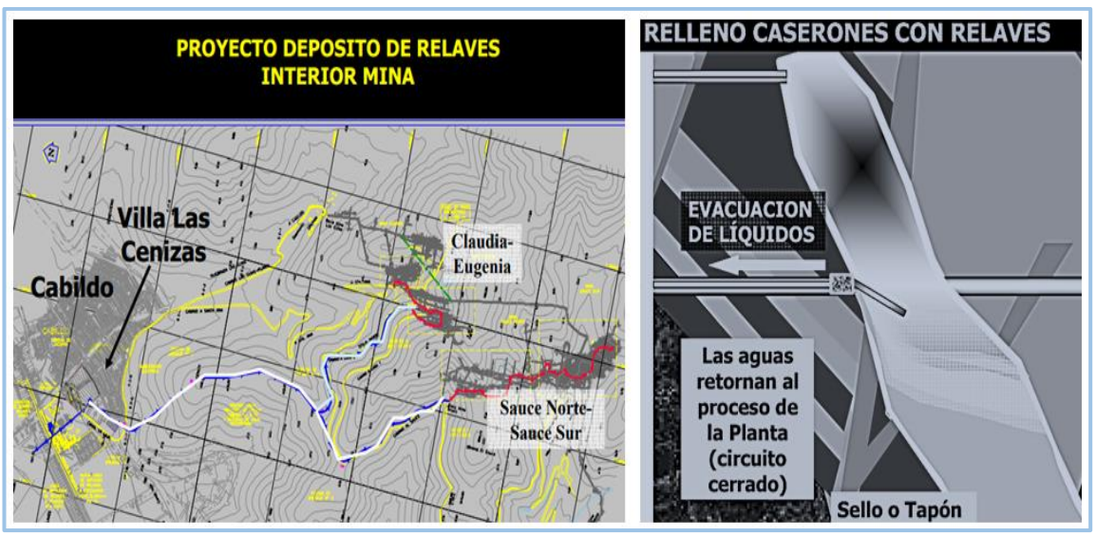
Fuente: Lara, J. 2013, Experiencias de operación de depósitos de relaves espesados y filtrados, Asociado, Líder del Grupo Geotécnico de Relaves.

Figura 1-6. Depósito de relave filtrado

1.2.8. Depósitos en Minas Subterráneas en Operación

Son depósitos en minas que aún siguen extrayendo sus recursos en el lugar, pero disponen de sectores donde ya no queda mineral que extraer, y se ocupa para la depositación de estos residuos del proceso, aminorando los impactos físicos y visuales adicionales a la explotación que ya se realiza.

Se eliminan los riesgos ambientales por infiltración de aguas, la emisión de material particulado al confinar la pulpa espesada, evitando la acción del viento, se incrementa significativamente la recuperación de agua de proceso, no hay impacto sobre el paisaje, se produce una mejora sustancial de la estabilidad del yacimiento al rellenar espacios vacíos. (Ver fig. 1-7)



Fuente: Minera Las Cenizas S.A., Agosto 2006, Gerencia de Operaciones Cabildo

Figura 1-7. Proyecto depositación de relave, interior mina Sauce, relleno de caserones con relave espesado e impulsado por tuberías, Minera Las Cenizas, Cabildo.

1.2.9. Depósitos en Minas Subterráneas Abandonadas

El uso de tajos mineros, así como labores subterráneas, para depositar relave es una de las opciones más atractivas en el manejo de los relaves.

De esta forma una parte de los relaves vuelve a su punto de origen reduciendo el impacto ambiental de la faena.

En este método el aspecto más relevante tiene que ver con el manejo de las aguas subterráneas y las aguas superficiales, siendo esencial que se construyan estructuras firmes para la contención del material al interior mina y no se produzcan infiltraciones a las napas subterráneas donde pueden esparcirse los contaminantes.

En cuanto a las aguas superficiales, se hace un mejor uso de los acotados recursos hídricos que posea el lugar y se trabaja posteriormente con la recuperación de dichas aguas del interior de la mina, donde se estén depositando los residuos espesados, bombeados por cañerías. (Ver fig. 1-8)

Fuente: Falcón, M. Junio 2017, Departamento de Depósitos de Relave, Sernageomin.

Figura 1-8. Depósito de relave en mina subterránea abandonada.

1.2.10. Depósitos de Relave inocuo

Un relave inocuo es un Depósito de Relaves no reactivo (químicamente estable), será aquel que no genera ácido ni contiene contaminantes, en tal caso, el cierre no contemplará más desafíos que el monitoreo permanente a futuro y sería posible forestarlo si la estabilidad física lo permite.

Para la minería en general, un objetivo moderno podría ser la generación de relaves inocuos en el proceso minero presente, esta alternativa requiere evaluación técnica y económica en cada proyecto minero, pero ofrece grandes ventajas ambientales.

Características especiales para considerar en el diseño de depósitos de relaves:

- Manejo de crecidas.
- Condiciones geológicas del sitio.
- Sismicidad.
- Materiales de construcción.

1.3. REQUISITOS DE UN DEPÓSITO DE RELAVES:

❖ AMBIENTAL

El depósito debe contar con la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) favorable del proyecto de depósito de relaves presentado.

En el caso de la pequeña minería, estos depósitos no ingresan al Sistema de Evaluación Ambiental (SEIA) si sus muros son menores de 5 m. y capacidad menor a 50.000 m^3.

❖ DISEÑO

- Se debe asegurar la estabilidad física del depósito.
- Este debe soportar solicitaciones sísmicas y situaciones adversas climáticas (lluvia, granizo, nieve, tormenta, etc.)
- También debe cumplir un factor de seguridad $\geq 1,2$
- Determinar la distancia peligrosa en Km y plano de la hoya hidrográfica afectada por la trayectoria más probable del relave en caso de colapsar.
- Con esto evitamos que el relave que se derrama al colapsar un depósito pueda ser controlado y que no se esparzan las especies contenidas.

❖ CONSTRUCCIÓN

Método de construcción (aguas abajo, eje central). Estas son obras asociadas al depósito de relaves tales como: sistema de recuperación de aguas, sistema de drenaje, muro de partida, muro de pie, vertedero de emergencia, etc.

- OPERACIÓN

Es la ubicación de la laguna de aguas claras lo más alejada del muro en tranques de relaves.

Se considera también dentro de las operaciones altura de la revancha, ancho de coronamiento, ángulo de talud externo, nivel freático, arenas constituida por no más de un 20% malla #200.

- EMERGENCIA

Se debe elaborar y mantener actualizado un Manual de Emergencias que le permita enfrentar de manera exitosa las situaciones adversas, climáticas, hidrológicas, sísmicas, etc. en caso de estar en el turno y verse afectado por estas.

1.4. PARTES GENERALES DE UN DEPÓSITO DE RELAVE

- MURO: Es una obra de ingeniería que permite la contención de los residuos sólidos que en ella se descargan, es decir, delimita la cubeta de un depósito.

- CUBETA: Una cubeta corresponde al volumen físico disponible para el depósito de los relaves (lamas), junto con gran parte del agua de los relaves. En la cubeta, el agua se localiza en la laguna de aguas claras.

- LAGUNA DE AGUAS CLARAS: Corresponde a la laguna de clarificación que se forma en la cubeta debido a la sedimentación o decantación de las partículas sólidas. La depositación de relaves (lamas) en la cubeta, que llega en una mezcla del sólido con agua para su transporte, en tanto los sólidos sedimentan a las capas inferiores, el agua forma esta laguna de aguas claras debido a la sedimentación de las partículas finas.

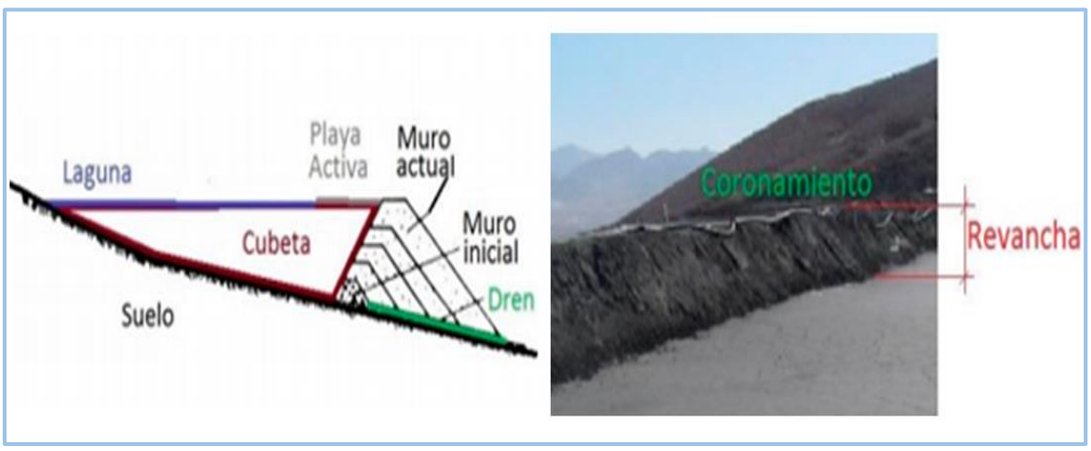
- SISTEMA DE DRENAJE: Es el sistema utilizado para retirar al grado adecuado el agua del interior del muro, con el objetivo de deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro y que se haga compacto el material sólido del fondo.

- REVANCHA: Es la diferencia menor, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención de un depósito y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o de la superficie del agua, que se produce en los tranques y embalses de relaves.

- CORONAMIENTO: Es toda la parte superior del prisma resistente o muro de contención, muy cercano a la horizontal.

- CANAL DE CONTORNO: Es el canal de desvío de las aguas de la cuenca que, captan y desvían las escorrentías superficiales, impidiendo el ingreso a la cubeta del depósito de relaves. Así no se mezclan aguas naturales y las del tranque.

- PLAYA ACTIVA: Es la zona donde se descargan los relaves en la cubeta, se le denomina playa porque usualmente esta seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas. Es la parte del depósito de relaves situada en las cercanías de la línea de vaciado, produciéndose una playa húmeda en cada descarga. (Ver fig. 1-9)



Fuente: Preguntas frecuentes, Sernageomin, consulta en línea.

Figura 1-9. Partes de un Depósito de Relaves en general.

El relave generado por parte de la minería no es en principio un residuo tóxico, sino fundamentalmente roca molida y agua, por lo que no es considerado un material tóxico en principio.

La toxicidad puede aparecer en estados posteriores al cierre de la faena, cuando el relave lleva tiempo reposando en el tranque, reaccionando con agua lluvia y oxígeno atmosférico, solubilizan los tóxicos que se pueden transportar disueltos en agua. Para aquellos relaves que contienen elementos que pueden ser considerados tóxicos para el ser humano, como arsénico, cianuro, cobre, cinc, cromo, plomo, etc.

Las empresas mineras deben resguardar, de acuerdo con la ley anteriormente mencionada, que dichas reacciones de solubilización de tóxicos no puedan tener lugar, para proteger la salud humana y del ambiente. Un depósito de relaves que no cumpla la normativa vigente puede contaminar a corto y largo plazo.

El objetivo de los depósitos de relaves es contener los sólidos, es decir, impedir impactos ambientales y específicamente, impedir la contaminación. Si los metales contenidos en los sólidos del relave se disuelven, podrían generar contaminación química.

El tiempo que dura la contaminación por depósitos de relaves abandonados es relativo, depende de las condiciones climáticas, presión, temperatura y todo aquello que mantenga contacto con el relave posterior al cierre de la faena.

Los relaves depositados pueden generar ácido sulfúrico, el que a su vez puede disolver metales tóxicos procedentes de los minerales del relave depositado.

En una explicación más extensa, los minerales son estables en contacto con aguas neutras en cuanto a su acidez, en términos químicos, cuyo pH esté en torno de 7.

Si las aguas son ácidas, en cambio, se pueden disolver los minerales, liberando en solución sus elementos componentes, que podrían ser contaminantes en caso de un derrame o de filtraciones a los suelos.

Un depósito con capacidad de generación de ácido, que deja de operar pero que reciba agua (lluvias, escorrentías, vertientes, afloramiento de agua al interior del depósito, etc.) puede contaminar durante siglos.

Por ejemplo, un mineral de arsenopirita (FeAsS) en lixiviación ácida produce arsénico soluble; hierro y sulfato en solución; el arsénico es un contaminante regulado y su concentración en un relave podría exceder los límites normados.

El ácido sulfúrico se genera por oxidación espontánea, natural de la Pirita y otros, cuando proviene de la minería del cobre.

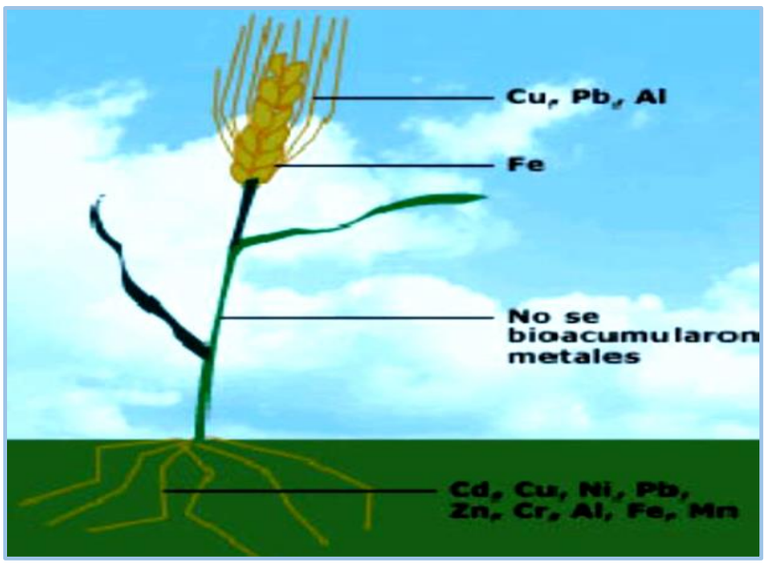
El ácido lixiviante, es aquel compuesto que puede producir una disolución, se puede generar a partir del relave mismo.

Basta tener, por ejemplo, mineral denominado pirita que es uno de los más abundantes (sulfuro de hierro (Fe_2S)), agua y oxígeno atmosférico para producir ácido sulfúrico (H_2SO_4) y hierro ferroso.

El ácido puede disociar otros minerales sulfurados si su pH llega a niveles suficientemente ácidos en la escala.

El ácido migra en el depósito, descomponiendo metales que quedan disueltos, estos metales interactúan en el ecosistema y se “bioacumulan” en las plantas (Ver Figura 1-10) y microorganismos del suelo.

Los metales circulan en los diversos niveles tróficos y pueden llegar hasta los seres humanos, causando daños a la salud.



Fuente: Servicio Nacional de geología y minería (Sernageomin), agosto 2016, situación de los relaves mineros, departamento de depósitos de relave, Gob. De Chile.

Figura 1-10. Bioacumulación de especies metálicas.

1.5. EL PASO A PASO PARA LLEGAR A PRODUCIR RELAVE

Se realiza una exploración geológica, que es la primera etapa, y sin ella, ninguna otra etapa posterior tendría sentido. Aquí, se identifica que hay un yacimiento con mineral suficiente para ser trabajado, se determinan sus características y se establece la mejor forma de explotarlo.

Luego se comienza la extracción, carguío y transporte, teniendo claro que existe un yacimiento, se decide comenzar a trabajar en él. Las rocas y los minerales combinados en forma de estéril con mineral se extraen de la mina y son transportados a la planta donde continúan los demás procesos de producción.

Se procede al chancado, que es la etapa en la que grandes máquinas reducen el tamaño del material extraído en la mina a porciones cada vez más pequeñas y compactas, de no más de 1,5 pulgadas.

Esto se logra a través de circuitos de chancado-molienda previamente proyectados en el diseño de la mina, donde se contempla el tipo de chancador indicado para el mineral que se está trabajando (chancador de mandíbulas, de impacto, de rodillos, entre otros) y el tipo de molino (ya sea, molino de bolas, de barras, AG, SAG, etc.). Después dicho material se ordena apilándolo.

Hasta ahí no hay diferencias en cuanto al tipo de mineral extraído de la mina, sin embargo, desde aquí, existen diferentes procesos productivos, dependiendo si el cobre se encontró en la naturaleza combinado con oxígeno (oxidado) o azufre (sulfurado).

Los yacimientos de cobre oxidado se encuentran más superficialmente y se distinguen por su color rojizo, producido por el contacto con el ambiente rico en oxígeno, mientras que para acceder a yacimientos de cobre sulfurado necesitamos desarrollar minería subterránea para extraerlo desde el interior de la corteza terrestre.

1.5.1. Procesos para la extracción del cobre oxidado

Lixiviación: las pilas de material mineralizado se riegan con una solución de agua con ácido sulfúrico que disuelve el cobre contenido en los minerales oxidados, formando una solución de sulfato de cobre. Esta solución escurre a través de la pila, acumulándose en piscinas, se le añade un compuesto orgánico selectivo para el cobre y luego se le adiciona ácido sulfúrico para la recuperación del metal, se purifica y se concentra antes de llevarla a la electroobtención.

Electroobtención: es una electrólisis, es decir un proceso mediante el cual se separa un compuesto (cobre en este caso) de otros, usando la conductividad de un medio acuoso electrolítico, obteniendo el cobre por diferencia de cargas. Así, se recupera el metal útil desde la solución desarrollada en la lixiviación, obteniéndose cátodos de la más alta pureza (99,99%).

Cátodos: los cátodos obtenidos son de cobre de alta pureza (99.99%) y su forma más común es en forma de planchas delgadas examinadas cuidadosamente. Aquellos seleccionados son apilados, pesados y embalados para su despacho, el que se realiza mediante trenes y camiones a los puertos de embarque para su posterior exportación.

1.5.2. Procesos para la extracción del cobre sulfurado

Molienda: mediante molinos se continúa reduciendo las partículas de mineral provenientes de la etapa de chancado, hasta obtener un tamaño máximo de 180 micrones (0,18 mm). Con esto se forma una pulpa con agua y reactivos que se lleva a la flotación.

Flotación: en esta etapa reaccionan los reactivos adicionados, se genera espuma, cuyas burbujas atrapan el cobre y otros minerales sulfurados contenidos en la pulpa. Después de varios ciclos, se recolecta y se seca esta espuma para obtener el concentrado de cobre.

Específicamente, las burbujas arrastran consigo los minerales sulfurados hacia la superficie, donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas que las conducen a estanques especiales, desde donde esta pulpa es enviada a la siguiente etapa.

El proceso es reiterado en varios ciclos, de manera que cada ciclo va produciendo un producto cada vez más concentrado. En uno de estos ciclos, se realiza un proceso especial de flotación para recuperar el molibdeno, cuyo concentrado alcanza una ley de 49% de molibdenita (MoS_2).

El producto del proceso de flotación, luego de varios ciclos en que las burbujas rebasan el borde de las celdas, se obtiene el concentrado, en el cual el contenido de cobre ha sido aumentado desde valores del orden del 1% (originales en la roca) a un valor de hasta 31% de cobre total. El concentrado final es secado mediante filtros y llevado al proceso de fundición.

Los productos de la flotación contienen habitualmente entre un 50% y 70% de sólidos. Gran parte del agua contenida en las pulpas producidas por la flotación es retirada en los espesadores de concentrado y cola, los que realizan simultáneamente los procesos de sedimentación* y clarificación**.

*Sedimentación es la separación de partículas sólidas en suspensión de un líquido; se realiza por asentamiento gravitacional, a través del tiempo.

**Clarificación es el proceso de aclarar el agua sucia con la remoción de los materiales suspendidos.

El producto obtenido en la descarga de los espesadores de concentrado puede contener entre 50% y 65% de sólidos.

El agua remanente en estos concentrados espesados es posteriormente retirada mediante filtros hasta obtener un valor final que va desde un 8% hasta un 10% de humedad en el producto final. Este último es la alimentación para la siguiente etapa.

Fundición: para separar el cobre de otros minerales e impurezas, el concentrado de cobre seco se trata a grandes temperaturas en hornos especiales. Luego de varios procesos se obtiene cobre RAF (refinado a fuego) el que es moldeado en placas de un peso aproximado de 225 kg, llamadas ánodos (99,6% - 99,7% de pureza).

Electrorefinación: los ánodos provenientes de la fundición se llevan a celdas electrolíticas para su refinación. De este proceso se obtienen cátodos de alta pureza (99,99% de cobre).

Este último método de extracción de cobre es el que nos compete en este trabajo, específicamente hablamos de la flotación y sus reactivos aplicados (ver ejemplos de reactivos en tabla 4) en el proceso; al momento de recibir la pulpa de la zona de chancado y molienda, se lleva a celdas de flotación donde se mantiene un proceso productivo de constante agitación.

Una vez en las celdas, añadimos espumantes para generar burbujas resistentes en el medio acuoso; colectores que realizan una acción hidrofóbica en el material sólido, causando la adherencia de las partículas de mineral útil a las burbujas, flotando el cobre y el molibdeno (minerales con valor comercial).

Además, se le anexan reactivos depresantes, que causan el efecto inverso de los colectores, realizando el trabajo de decantar otros minerales como la pirita, que es un sulfuro que no tiene cobre, por lo tanto, no tiene valor comercial.

Y, por último, reactivos modificadores, que regulan parámetros como la nivelación del pH en la solución, como la cal, que sirve para estabilizar la acidez de la mezcla en un valor de pH determinado, proporcionando el ambiente para que ocurra todo el proceso de flotación selectiva del cobre, además de depresar gangas.

Este proceso genera relave diariamente, con alto contenido de pirita y otros metales, que, por contacto con el ambiente, comienzan su oxidación al ser depositados y permanecer expuestos al oxígeno atmosférico.

El empleo de carbonato de calcio sería aplicable como reactivo para las flotaciones en las celdas, además de la aplicación directa en los tranques de relave como modificador de pH y depresor de gangas.

Siendo necesario sacar el mineral en bruto de la mina, conminuirlo, separarlo y adicionarlo en las celdas, midiendo con el pHmetro los parámetros ácido-básico, al igual que al momento de la adición en cualquier tipo de relave, regulando los parámetros de cada depósito.

Tabla 1-3. Reactivos utilizados en plantas concentradoras de minerales por flotación.

Colectores (1)	Espumantes (2)	Modificadores (3)	Floculantes, coagulantes, dispersantes (4)
Mercaptanos	Aceite de pino	Sulfatos de cobre y cinc	Poliacrilamidas
Tioureas	Metilisobutil carbinol	Cromatos-dicromatos, hipocloritos	Poli óxidos de etileno
Tiocarboxilatos	Ácido cresílico	permanganatos	Poliaminas
Tiocarbamatos, carbonatos y fosfatos	Propileno glicoles	Sulfuro de sodio, penta sulfuro (Nokes)	Policarboxilatos
Aceites, alcatrán	Parafinas alcoxi substituídas	Cianuros, ferrocianuros	Aluminatos sódicos
Ácidos grasos	Alcoholes (diversos)	Fluoruros y sulfitos de sodio	Sulfatos de hierro y aluminio
Dixantógenos		Quebracho (poli fenoles), lignosulfonatos	Silicatos solubles
Aminas		Sales de Pb	Polisacáridos
Alquilsulfatos, carbonatos, sulfonatos y fosfatos		Ácidos cítricos y tánicos	Polifosfatos

Fuente: M. Santander, M. Paiva, R. Silva, J. Rubio; (2011), ‘’Tratamiento de riles del sector minero-metalúrgico y reutilización de las aguas’’, Departamento de Metalurgia, CRIDESAT, Universidad de Atacama, Chile.

Una práctica simple y común empleada en el control de efluentes minero-metalúrgicos es la neutralización con cal, dolomita, soda cáustica, amonio o cenizas, para las aguas ácidas; y con ácido sulfúrico, para las básicas. Estas prácticas permiten precipitar (coprecipitación) los metales pesados presentes en el efluente.

[La coprecipitación es el proceso por el cual una especie que normalmente es soluble se separa de la disolución durante la formación de un precipitado, decantando el sólido al fondo de la mezcla.]

Lo que se propone es la medición de pH de un relave extraído de Minera Migrin, y hacerle pruebas con cal viva y el carbonato de calcio extraído directamente de la mina Blanco 3 de Enami.

Pensando en la ampliación de las opciones de modificadores de pH, no solo limitarse a la cal viva como agente modificador-depresor, ya que su proceso productivo requiere de varios pasos que se podrían evitar, abaratando costos de producción, con la adición del carbonato de calcio directamente en las mezclas que lo requieran (en flotación y relaves).

La cal es uno de los materiales conglomerantes más utilizados a lo largo de la historia tanto en el campo de la construcción como en el de la creación artística (sobre todo por su empleo en la pintura de murales).

Su uso se remonta al Neolítico y se extiende, de manera generalizada, hasta la aparición del cemento a nivel comercial, en el siglo XIX, también para pintar (encalar) muros y fachadas de los edificios construidos con adobes o tapial, habitual en las antiguas viviendas mediterráneas, en la fabricación de fuego griego.

En algunos países de Latinoamérica, la cal se utiliza para el proceso de nixtamal, proceso utilizado para hacer sémola de Maíz y masa para tortillas.

Es uno de los productos químicos básicos que resulta de la calcinación de piedra caliza (Carbonato de Calcio) en hornos, proceso del que se obtiene la cal viva, la cual después de apagarse con agua se convierte en cal hidratada y es seleccionada según las especificaciones del cliente.

1.5.3. Proceso Productivo de la Cal

- Selección y explotación del yacimiento de piedra caliza.

- EXTRACCIÓN DEL YACIMIENTO NATURAL:

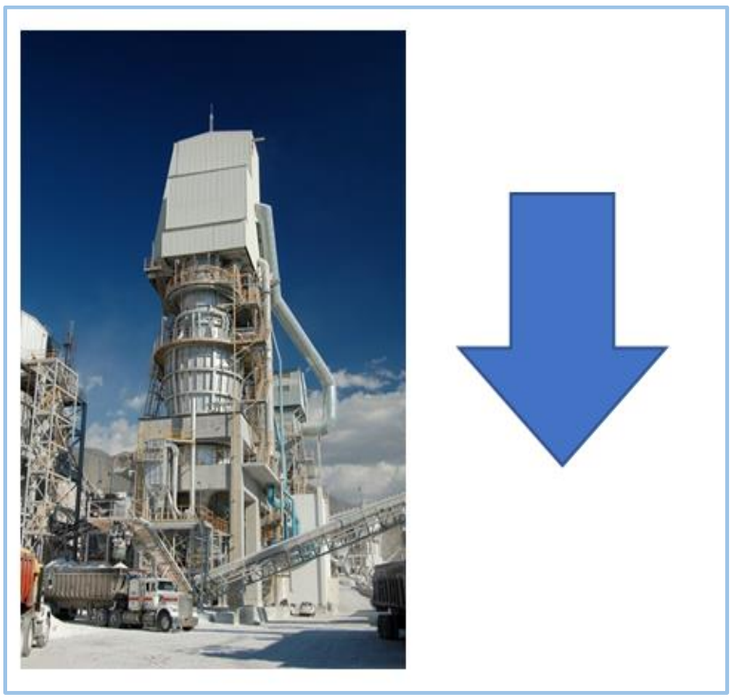
La piedra caliza es triturada y clasificada de acuerdo con su tamaño y características, siendo ésta la materia prima que se ha de usar en el proceso de calcinación. Durante el proceso de calcinación, la piedra caliza es transformada en Cal Viva u Óxido de Calcio. (Ver fig. 1-11 y 1-12)

Fuente: Ancade, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

Figura 1-11. Explotación y barrenación de caliza.

Fuente: Ancade, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

Figura 1-12. Carga y acarreo de caliza.

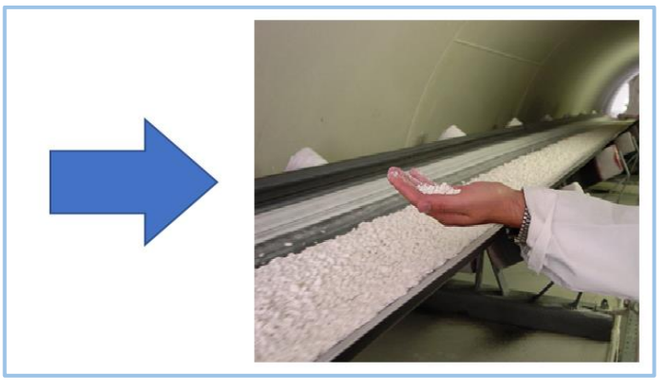


Fuente: Ancade, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

Figura 1-13. Trituración.

Fuente: Ancade, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

Figura 1-14. Calcinacion de caliza en horno Maerz / Rotatorio.



Fuente: Ancade, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

Figura 1-15. Óxido de Calcio (CaO).

La cal es uno de los reactivos modificadores de mayor uso en la industria minero-metalúrgica, se ha probado durante los años su efectividad como depresor de gangas y regulador de pH, de ácido a alcalino, debido a que la caliza se encuentra de forma regular en los suelos.

Este compuesto químico, posee buena solubilidad en el alcohol y en los ácidos, el principal uso del óxido de calcio (CaO) o cal viva en minería es como reactivo en procesos de flotación de minerales con presencia de sulfuros de cobre, o en lixiviación en pilas con extracción cianurada para minerales auríferos. Así como en fundiciones de cobre, pero también, tiene otros usos como: estabilización de relaves y caminos, formación de bloques de tierra comprimida, pintura, construcción, agricultura, en la industria alimentaria sirve para el refinamiento del azúcar, para el proceso de la celulosa y papel, empleos ambientales como el tratamiento del aire y las aguas con sólidos, la creación de productos cerámicos, etc.

Fuente: Anfacal, Datos Técnicos de la cal y sus derivados.

Figura 1-16. Óxido de Calcio.

Dependiendo de la utilización de la cal nos encontramos diferentes definiciones a partir de los variados usos que posee el óxido de calcio:

- Cal siderúrgica: es un tipo de cal viva con al menos 90% de óxido de calcio y muy bajos contenidos de sílice, azufre y fósforo.

- Cal química grado alimenticio: Es una particularidad de la cal química que además de la alta concentración de hidróxidos cumple las normas de contenidos máximos de metales pesados y compuestos nocivos para la industria de alimentos.

- Cal agrícola: envuelve toda la gama de cales incluidos los carbonatos precursores de las mismas, la particularidad es que su aplicación es como un mejorador de suelos agrícolas.

- Cal de construcción: comprende los hidróxidos de calcio con o sin magnesio, denominados cales hidratadas con contenidos del 75% al 85% en dichos hidróxidos y que su campo de aplicación se enfoca a la industria de la construcción.

- Cal viva granulada: se emplea cuando se requiere de un tiempo prolongado de residencia en el proceso para que este logre una adecuada hidratación, que le permita liberar todos los iones de calcio y grupos hidroxilos. Adicionalmente, se recomienda para aquellos procesos de flotación donde es necesario preparar grandes volúmenes de lechada de cal.

- Cal viva molida: se emplea en donde el tiempo de residencia en el proceso sea más corto y se busca aprovechar el calor de hidratación de la cal en la cinética del proceso. Se recomienda en faenas con consumos de cal inferiores a las 300 Ton/mes.

- Cal Grasa: Es la más blanca, fabricadas con piedra Caliza de gran pureza y que contenga menos de 5% de Arcilla, que en presencia de Agua reaccionan con fuerte desprendimiento de calor.

- Cales Magras: Son las que proceden de la Caliza que y contengan menos del 5% de Arcilla, contienen más del 10% de Magnesia. Estas cales al añadirles agua para hacer la cal apagada se deslíen y disuelven, por lo que no se usan en la construcción.

- Cales hidráulicas: Proceden de la calcinación de la caliza que contienen más del 10% de arcilla y tiene la propiedad de poder fraguar en sitios húmedos y aún debajo del agua.

Fuente: Anfacal, Datos Técnicos de la cal y sus derivados.

Figura 1-17. Cal Metalúrgica.

Fuente: Corporativo Químico Global S.A., cal metalúrgica y cal viva.

Figura 1-18. Cal hidratada.

Cal química o Cal Hidratada: Para producir cal hidratada, la cal viva es transportada al proceso de hidratación en el que se le agrega agua para producir hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$, cal hidratada, cal aérea o calhidra, en este caso, el tiempo de residencia necesario es mucho menos que para las cales vivas. Su uso se recomienda para faenas con limitaciones de aprovechamiento de agua.

En contraste al proceso completo de la cal viva pasada por calcinación, el carbonato de calcio se encuentra en forma de caliza en la corteza terrestre.

Se recupera con mejor o menor pureza, dependiendo de la oxidación, lo que se nota a simple vista en los cambios de color que presentan las diferentes muestras de carbonato de calcio extraídos de la mina Blanco 3, de Enami, entre más calcio posee el fragmento de mineral, más blanca se ve la roca (Ver figura 1-19).

Por lo que al momento de extraer el mineral se toma en consideración tres tipos de carbonato de calcio, con alta, mediana y baja pureza, seleccionando las rocas por tonalidad y separándolas en bolsas para ocuparlas en la experimentación. Así se puede contrastar el efecto de un carbonato de calcio con impurezas y un óxido de calcio tratado, en la modificación del pH en el relave.

Fuente: Gentileza de Enami.

Figura 1-19. Entrada de la mina de carbonato de calcio Blanco 3, propiedad Enami.

Para añadir estas piezas minerales es necesario conminuir la roca para adicionar en forma homogénea el reactivo y que se pueda disipar en los medios acuosos con éxito, llegando a todas sus partes y reaccionando como depresor de gangas o metales pesados y regulador de pH de ácido a alcalino.

Adicionalmente, serviría para abaratar los costos asociados a reactivos, pudiendo ser una opción la extracción/producción propia de este mismo, o la respectiva compra a pequeñas y medianas minas, donde se extraiga la caliza en bruto.

La mina Blanco 3, propiedad de Enami, es una mina de mediana envergadura que se dedica a la extracción de la caliza en bruto desde el año 2013, directamente extrayendo la roca del cerro, en la localidad de Quelón, Los Vilos, Cuarta Región.

Esta se dedica solo a retirar las colpas de carbonato de calcio de la mina, que se extiende como beta por debajo de las cadenas montañosas del lugar y comercializarlas a plantas aledañas a Cabildo, donde el material es procesado y convertido en cal viva para ser comercializado.

Se espera comprobar la efectividad del carbonato de calcio sin la necesidad de un proceso productivo entre medio que contempla la calcinación de la roca, extrayendo el mismo en forma de caliza desde las menas que posean un alto contenido de calcio.

El calcio como tal, consume el ácido, o sea que es afín a los relaves provenientes de procesos que usen ácido sulfúrico y/o químicos que contengan alcohol, es importante regular los parámetros de acidez como se pudo apreciar anteriormente, porque si no se regula de forma constante, pueden generar ácido por oxidación de los componentes químicos en la solución y por ende una contaminación dañina en el caso de infiltraciones no tan solo para las personas, sino, que también para el ecosistema en general.

Los procesos mineros y metalúrgicos deben tomar la responsabilidad de tratar sus residuos puesto que son parte de la producción que llevan a cabo, por lo que debe ser fundamental a la hora de pensar en el procesamiento de un metal con algún valor comercial o beneficio disponer el sobrante sin valor de forma segura.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE CONTENIDO

2. DESARROLLO DE CONTENIDO

2.1. NORMATIVA DE RELAVES

Los relaves que fueron mencionados en el primer capítulo son normados por el Decreto Supremo 248, del Sernageomin sobre Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relave, que se encuentra inserto en la Normativa de Seguridad Minera, del Sernageomin, esta rige todos los aspectos técnicos, siendo regulados constantemente para evitar las filtraciones al medio que rodea los depósitos, asegurar la adecuada construcción y mantenimiento, ya que de no ser así pueden verse afectados, tanto los suelos, como las aguas subterráneas que se encuentran por debajo de estas mega construcciones.

Esta normativa considera:

1. La necesidad de proteger la salud y seguridad de las personas, la protección del medio ambiente y la utilización racional de los recursos naturales como el agua.

2. La diversidad de sistemas de depósitos de relaves y el avance que han experimentado los métodos de diseño, construcción y operación de aquellos.

3. La necesidad de precisar las exigencias técnicas para obtener la aplicación de conceptos más avanzados en la construcción de depósitos de relaves de la minería chilena.

4. La importancia de dar cumplimiento a las disposiciones sobre eficiencia y coordinación de los órganos de la Administración del Estado, contenida en el D.F.L. N°1/19.653, de 2000, que fija el Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la Ley N°18.575, Orgánica Constitucional de Bases de la Administración General del Estado.

Los elementos que se encuentran en un relave en mayor cantidad son metales como los que se pudiesen apreciar en la siguiente tabla con concentración de iones más frecuentes en mg/L.

Tabla 2-1. Características de las aguas residuales de circuitos de flotación de minerales.

Iones	Sulfuros metálicos	pH de disolución
Ag^{+1}	0,02-0,1	< 12
Cd^{+2}	0,05-17	< 9,5
Cr^{+3}	0,03-40	< 3
Pb^{+2}	0,01-560	< 6
Mn^{+2}	0,007-570	< 10,7
Fe^{+3}	15-3000	< 4
Al^{+3}	10-2500	< 4,9
Mo^{+4} $(MoO_4)^{-2}$	0,05-5	< 4
Zn^{+2}	0,02-3000	< 7
SO_4^{-2}	5-12500	< 2
CN^-	0,01-0,45	-

Fuente: M. Santander, 2011,'' Tratamiento de riles del sector minero-metalúrgico y reutilización de las aguas'', Departamento de Metalurgia, CRIDESAT, Universidad de Atacama. Y Takeno, N. 2005, ''Atlas of Eh-pH diagrams'', Geological Survey of Japan Open File Report No. 419, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

En la tabla anterior, se muestran los metales que se encuentran presentes al momento de enviar los residuos sólidos y líquidos generados por la flotación a sus respectivos lugares de depósito, ya sean tranques, embalses, depósitos de superficie o subterráneos; los metales más comunes que podemos encontrar en la ganga son iones de Plata, Cadmio, Cromo, Plomo, Manganeso, Hierro, Aluminio, Molibdeno y Zinc, además de complejos sulfatos y cianurados. (Metales pesados)

Los pH que se encuentran a la derecha de la tabla representan los niveles de acidez que debe presentar la solución donde están depositados los residuos, para que se mantenga el metal disuelto en la fase acuosa o en estado líquido, según el ''Atlas of Eh-pH diagrams'' derivado de los respectivos diagramas de Pourbaix a una T° de 25°C y a 1 Mol.

Es necesario analizar estos valores, porque el peligro de la filtración de los contenidos de un relave es la reactividad que tienen los metales al contacto con el ambiente, específicamente con el oxígeno; al oxidarse y dispersarse por los suelos son absorbidos por animales y plantas, los que al incorporar estos metales en sus células se ven intoxicados por acumulación de metales en concentraciones o simplemente al estar a un pH muy ácido para sus estructuras, mueren envenenados. (Ver fig. 2-1)

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)

Figura 2-1. Escala del pH

Dentro de los factores a considerar hablamos del pH, representado en una escala que va del 0 al 14, siendo 0 extremadamente ácido, 7 neutro, y 14 extremadamente básico (Como se muestra en la Figura 2-1).

Se destacan los lugares bajo pH 4, que son los parámetros donde la fauna acuática se ve afectada de forma directa, por ser su medio de desplazamiento primordial el cauce de las aguas naturales. Los suelos y las plantas que subsisten en los alrededores se ven secundariamente afectados, ante una eventual filtración del contenido de un tranque o depósito de relave, para esto se hace necesario mantener el aislamiento de la solución e impedir su esparcimiento en el medio ambiente, para no impactar de forma negativa la zona.

Se debe ser consciente de las adversidades, por ejemplo, eventualidades como desastres naturales o desequilibrios producidos por fuerzas externas a lo controlable, lo que hace que nos preparemos como personas responsables a situaciones que pueden suceder y que suceden más frecuentemente de lo que la comunidad quisiera tolerar. Ahí está la importancia real del desarrollo del trabajo, el poder mantener un equilibrio entre las personas que se dedican a la explotación de yacimientos de minerales con el medio ambiente que se interviene al desarrollar la explotación.

Tal como se puede observar en la escala de pH que aparece anteriormente, el agua pura tiene un valor de pH de 7, este valor se considera neutro, ni ácido ni básico. La lluvia limpia normal tiene un valor de pH de entre 5,0 y 5,5, nivel levemente ácido.

Sin embargo, cuando la lluvia se combina con dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, producidos por las centrales eléctricas y los automóviles, la lluvia se vuelve mucho más ácida. La lluvia ácida típica tiene un valor de pH de 4,0.

Una disminución en los valores de pH de 5,0 a 4,0 significa que la acidez es diez veces mayor, por lo que se debe evitar a toda costa que los metales se dispersen en el medio que los rodea.

Diferenciar los depósitos de relave según la disposición de sus aguas es importante para mantener una idea de la dimensión y del área que ocupan estas instalaciones, asi como el amplio contacto que mantienen las soluciones con el oxígeno ambiental, parámetro a considerar si queremos mantener en equilibrio mas tiempo el relave en cuanto a la mantención del pH, en la regulación de la solución ácida continuamente con cal.

Una pulpa de relaves con suficiente agua se comportará como una suspensión acuosa, cuya viscosidad aumenta si disminuye el agua, hasta que, para contenidos de agua suficientemente bajos se comportará como un lodo espeso y eventualmente, como un suelo húmedo, pero sin dispersar sus componentes.

Un depósito de relave es una obra que se construye para contener en forma segura los relaves provenientes de una planta de tratamiento o beneficio de minerales por flotación.

EXPERIMENTALMENTE SE PUEDE SEÑALAR QUE:

- Si la razón (sólido-agua) S:A es menor que 50%, la pulpa de relaves se comporta como suspensión acuosa, y escurrirá incluso con pendiente menores al 2% y se produce segregación de las partículas con la distancia al punto de descarga.

- Si la razón (sólido-agua) S:A es mayor o igual que 55% la pulpa de relaves comienza a tener comportamiento de un lodo viscoso; disminuye fuertemente la segregación de partículas y se necesitará pendientes mayores al 2% para escurrir.

- La siguiente tabla nos indica la pendiente límite que admite una pulpa de relave para distintas concentraciones de sólidos en peso (pendientes mayores producirán su escurrimiento)

Tabla 2-2. Pendiente límite que admite una pulpa según su concentración de sólidos.

VARIACION DE LA PENDIENTE LIMITE CON LA CONCENTRACIÖN DE SÓLIDOS EN UNA PULPA DE RELAVES	
Pendiente Límite %	Porcentaje de Sólido en Peso %
< 2	< 50
2-3	55-66
3-5	60-63
4-6	63-65
> 6	> 65

Fuente: Ramírez, N. Diciembre 2007, Guía Técnica de operación y control de depósitos de relave, Departamento de Seguridad Minera, Sernageomin.

2.2. DEPÓSITOS DE RELAVE Y MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN

Los Depósitos de relave tienen métodos de construcción definidos como:

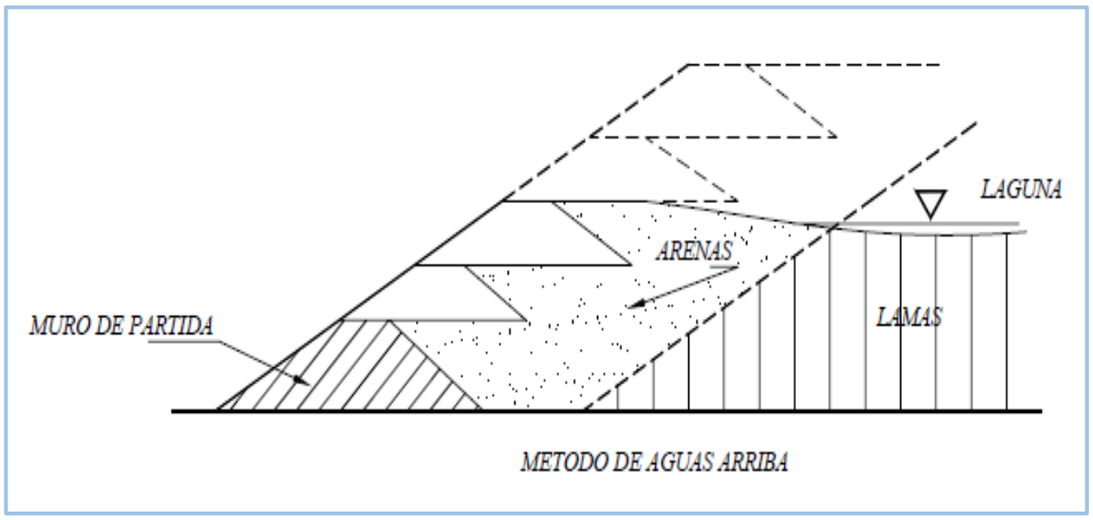
2.2.1. Método Aguas Arriba

Este consiste en un muro inicial o de partida construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la depositación de los relaves, utilizando clasificadores denominados hidrociclones; la fracción más gruesa o arena, se descarga por el flujo inferior del hidrociclón y se deposita junto al muro inicial.

Mientras la fracción más fina o lamas, que sale por el flujo superior del hidrociclón se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado del muro, de modo tal que se va formando una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas y gran parte del agua escurre, formando el pozo de sedimentación o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga, que pueden ser las denominadas torres de evacuación o se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante.

Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas arriba y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se continúa sucesivamente la construcción en la forma indicada.

Con este método, en la práctica, se pueden alcanzar alturas de hasta 25 metros (ver figura 2-2), si bien este es el que requiere un menor volumen de material arenoso, ha sido utilizado en la pequeña minería para construir numerosos tranques, es el que produce el tipo de muro menos resistente frente a oscilaciones sísmicas, es por ello por lo que, en la actualidad en Chile, no está contemplado aprobar este tipo de proyecto de tranques de relaves en la legislación vigente.



[Fuente: Bernal, M. Diciembre 2012, Estabilidad sísmica en presa de relave construida por el método de eje central, Universidad de Chile, Santiago.]

Figura 2-2. Método de aguas arriba.

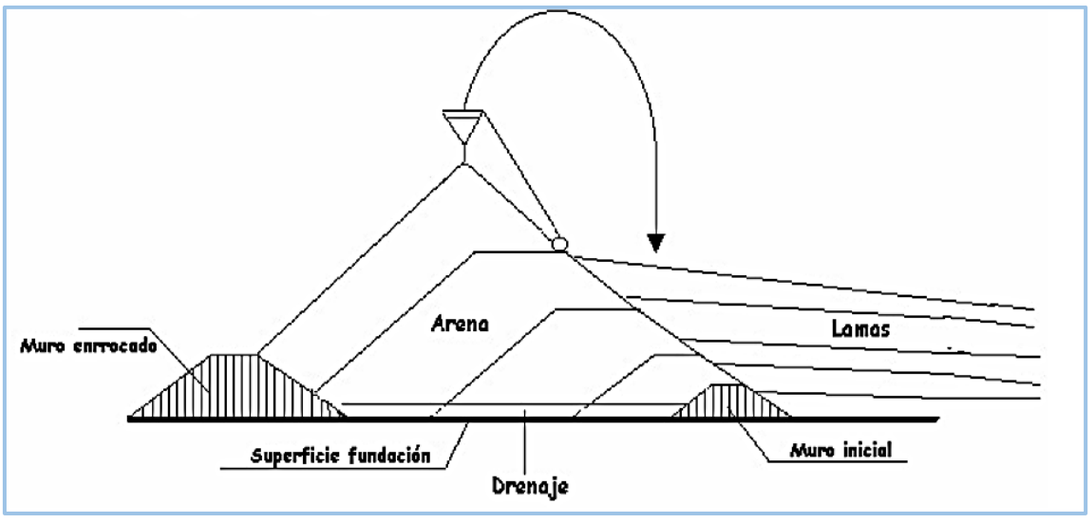
2.2.2. Método Aguas Abajo

La construcción se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado desde el cual se vacía la arena cicloneada hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba.

Cuando el muro se ha peraltado lo suficiente, usualmente 2 a 4 m., se efectúa el levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas abajo y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas y peralte del muro.

A veces se dispone también de un segundo muro preexistente aguas abajo (ver fig.2-3). Las arenas se pueden disponer en capas inclinadas, según el manteo del talud del muro de partida, o bien, disponerlas en capas horizontales hacia aguas abajo del muro de partida.

Este método de aguas abajo requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables del punto de vista de la resistencia sísmica.



Fuente: Bernal, M. Diciembre 2012, Estabilidad sísmica en presa de relave construida por el método de eje central, Universidad de Chile, Santiago.

Figura 2-3. Método de aguas abajo (capas de arena inclinados)

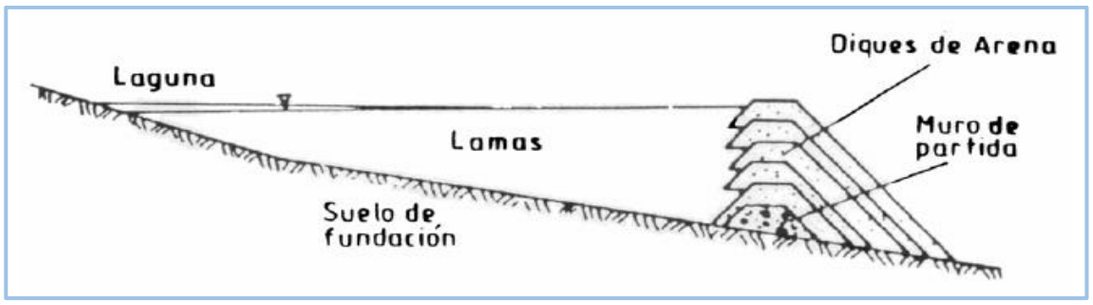
2.2.3. Método Eje Central o Mixto

Se inicia al igual que los métodos anteriores con un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el lado de aguas abajo y las lamas hacia el lado de aguas arriba. Una vez completado el vaciado de arenas y lamas correspondiente al muro inicial, se eleva la línea de alimentación de arenas y lamas, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida. Lo que permite lograr un muro de arenas cuyo eje se mantiene en el mismo plano vertical, cuyo talud de aguas arriba es más o menos vertical, y cuyo talud de aguas abajo puede tener la inclinación que el diseño considera adecuada.

Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los 2 métodos anteriores, y permite lograr muros suficientemente estables.

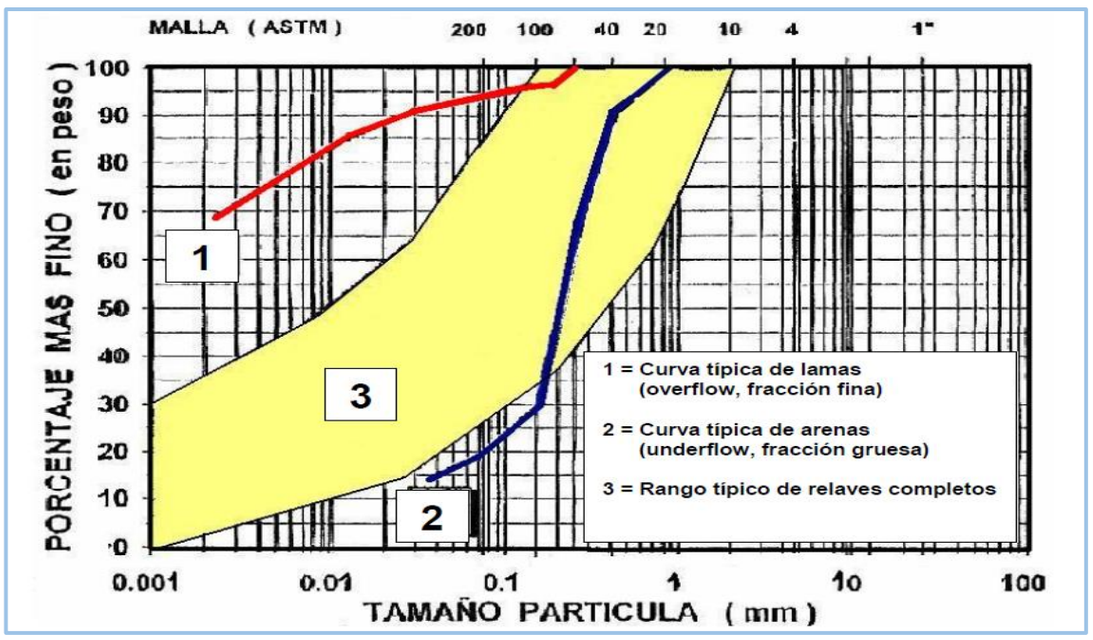
Estos métodos constructivos del muro de arenas de los Tranques de Relaves mencionados anteriormente son sobradamente conocidos en Chile, siendo los métodos de aguas abajo y eje central los que contempla hoy nuestra legislación en los proyectos de Tranques de Relaves que se presentan al Servicio Nacional de Geología (SERNAGEOMIN) para su aprobación.

La inseguridad que muchas veces despiertan los tranques de arenas de relave no deben atribuirse al material con que se construyen, sino al sistema de construcción por relleno hidráulico que puede inducir elevadas presiones de poros e incluso la licuefacción total en caso de un sismo. Sin embargo, las técnicas modernas de diseño, construcción y control permiten obtener estructuras seguras a base de buenos sistemas de drenaje, de un eficiente sistema de ciclonaje y disposición de las arenas, y también de una buena compactación de la arena que permita alcanzar una elevada densidad. (Ver fig. 2-4)



Fuente: Bernal, M. Diciembre 2012, Estabilidad sísmica en presa de relave construida por el método de eje central, Universidad de Chile, Santiago.

Figura 2-4. Método eje central.



Fuente: Ramírez, N. Diciembre 2007, Guía Técnica de operación y control de depósitos de relave, Departamento de Seguridad Minera, Sernageomin.

Figura 2-5. Distribuciones granulométricas típicas de relave de Cobre.

Desde 1970 que el Estado de Chile empieza a precisar las exigencias tecnológicas en la construcción de los depósitos de relave, debido a los acontecimientos de colapso de depósitos como el tranque Barahona de la Mina El Teniente, Sexta región, ocurrido durante el terremoto de Talca de octubre de 1928 (Muerte de 54 Personas) y el tranque de la Mina El Soldado, Quinta región, ocurrido durante el terremoto de marzo de 1965 (Mueren aprox. 200 personas), esto lleva a tomar la determinante decisión de enfrascar dentro de un marco legal las especificaciones de construcción y mantención de los depósitos de relave, para que no ocurrieran estos desastres nuevamente, lo que implica no tan solo pérdidas monetarias, si no que pérdidas humanas y un daño elevado al medio ambiente.

Los decretos que determinan la responsabilidad del Estado para la construcción de los depósitos de relaves son:

- El Decreto DS N 86 del Ministerio de Minería de 1970, el cual estuvo en vigencia durante 36 años y que aprobó el reglamento de Construcción y Operación de los tranques de Relaves.

- El DS N 248 del Ministerio de Minería de 2006, que deroga el DS 86, es el que rige actualmente y que se denomina “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves.

Se debe aplicar la normativa vigente que dice:

Artículo 2: Toda faena minera que genere y deba depositar relaves como parte del proceso extractivo, está obligada a cumplir las disposiciones del presente Reglamento (Normativa de Seguridad Minera).

Artículo 3: Corresponde al Servicio Nacional de Geología y Minería la aplicación y fiscalización del presente Reglamento, sin perjuicio de las atribuciones que en materia de fiscalización posean otros órganos del Estado.

Artículo 5: Para los efectos del Reglamento de Seguridad Minera, los conceptos que a continuación se indican tienen el siguiente alcance:

a) Aguas claras: Son aguas libres, en gran medida, de partículas en suspensión que se ubican en un sector de la cubeta de los depósitos de relaves mineros, tipo tranque de relaves o embalse de relave, una vez decantados naturalmente los sólidos finos de la pulpa de relaves.

b) En otras palabras, es agua que al decantar los residuos sólidos al fondo del tranque, se separan del contenido total de la masa de relave, quedando sobre el material compacto y migrando a través de la evaporación al ambiente.

c) Cierre: Hecho que el depósito de relaves deje de operar por un plazo mayor de dos años o en forma definitiva o cuando se da por terminada su vida útil y se han efectuado las acciones tendientes a asegurar la obra en el tiempo.

d) Cierre temporal: el hecho que el depósito de relaves deje de operar durante un plazo igual o menor a dos años.

e) Coeficiente de permeabilidad: Es la constante que determina la permeabilidad de un suelo o de cualquier zona del tranque de relaves, mediante la expresión: $K=v/i$, en que v es la velocidad de descarga del agua a través del suelo, e i es el gradiente hidráulico.

f) Colapso: Es una falla estructural del depósito que involucra la liberación de un volumen importante de masa de relave y que produce un impacto ambiental significativo.

g) Concentración: Es el proceso de aumento de la ley de un mineral sin producir una transformación química, esto genera un material que contiene las especies principales a recuperar, llamado concentrado, y el material de descarte, que para el caso de este efecto se denomina relave.

h) Construcción: La ejecución de todas las obras que se requieren para la descarga y la contención de los relaves, como también, de sus obras anexas, de acuerdo con el proyecto aprobado.

i) Coronamiento: La parte superior del prisma resistente o muro de contención, muy cercano a la horizontal.

j) Densidad Proctor: Corresponde al peso unitario máximo que recibe un depósito de relaves, determinado por el ensayo de compactación normalizado AASHOT – 180-57/0.

k) Depósito de Relaves: Toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una Planta de concentración húmeda de especies de minerales, además, contempla sus obras anexas. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente definitivo de los materiales sólidos provenientes del relave transportado desde la Planta de beneficio, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos.

l) Diseño: Concepción ingenieril del depósito de relaves y obras anexas.

m) Distancia peligrosa: La distancia, en kilómetros, que recorrería el relave en el caso de colapso del depósito.

n) Licuefacción: Pérdida total de la resistencia al corte del material de relaves del depósito, por incremento de la presión de poros.

o) Modificación significativa: Cambios importantes del ritmo de operación del depósito de relaves, cambios en la forma de construcción del prisma resistente, ampliación o forma de depositación de los relaves, como también, adelantos tecnológicos, que no impliquen una simple ampliación de tratamiento para copar las capacidades establecidas en el proyecto original de las instalaciones.

p) Operación: Todas las obras, acciones o actividades, que tienen por finalidad llevar a cabo la etapa de depositación de los relaves.

q) Presión de poros: Es la presión en el agua contenida en los intervalos de las partículas de relaves, ya sea estática por la columna de agua, o dinámica por una reducción brusca de los poros.

r) Proyecto de Depósito de Relaves: Es el conjunto de estudios técnicos requeridos para la definición de un sistema de disposición de relaves, incluyendo etapas de investigación, prospección, diseño, evaluación y construcción, cuyos resultados se encuentran en una serie de documentos.

s) Reanudación: Es la acción de poner en marcha el depósito de relaves después de un cierre temporal de las operaciones de la faena.

t) Relave: Suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplica, también, a la fracción sólida de la pulpa que ya se encuentra sin agua.

u) Revancha: La diferencia menor, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención del depósito y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o de la superficie del agua, que se produce en los tranques y embalses de relaves.

v) Todas las especificaciones y definiciones propuestas por el Sernageomin a través del Reglamento de Seguridad Minera deben ser claros, de manera de permitir su completa comprensión de la ingeniería que conllevan, incluyendo sus procedimientos de operación y los métodos y obras consideradas para garantizar la estabilidad física y química del depósito y su entorno, con el fin de proteger a las personas, bienes y medio ambiente.

Artículo 6: Para los efectos del Reglamento nombrado Normativa de Seguridad Minera, se entiende por:

a) Ángulo de talud externo: Corresponde al ángulo formado por la superficie del talud externo del prisma resistente con el plano horizontal. Generalmente se designa por la letra b.

b) Cubeta: La zona del depósito de relaves en la cual se acumularán (según el proceso de sedimentación) los sólidos de grano más finos de los relaves, en el caso de los Tranques de Relaves, o la totalidad de los relaves, en los otros sistemas de depositación.

c) Dren: El sistema utilizado para deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro de contención. Este sistema, generalmente, se construye en la base del muro.

d) Embalse de relaves: Aquel depósito de relaves donde el muro de contención está construido con material de empréstito y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. La impermeabilización puede estar realizada con un material natural de baja permeabilidad o de material sintético como geomembrana de alta densidad. También se llama embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere la construcción de un muro de contención.

e) Muro de contención o prisma resistente: La zona periférica del depósito de relaves estructurada artificialmente, que complementa el perímetro natural para conformar la zona de la Cubeta.

f) Muro de empréstito: El muro de contención que se ha construido totalmente de material grueso o granular, convenientemente dosificado y compactado con material menos grueso, que no proviene del material del relave.

g) Muro de inicio o muro de partida: En el caso de los tranques de relave, es un pequeño muro de empréstito para permitir la contención inicial de los relaves en condiciones de estabilidad. Sobre este muro se continúa la depositación de las arenas gruesas, aumentando la altura del muro.

h) Muro de pie: Es el que se construye, generalmente de material de empréstito, en el extremo de aguas abajo del muro de contención. Tiene por objeto dar un límite físico al depósito de relaves y evitar el derrame de material fuera de la traza del prisma resistente.

i) Nivel freático: Es la cota de los puntos en que el agua de los poros tiene presión neutra igual a cero.

j) Piezómetro: Es el artificio que mide el nivel freático.

k) Relaves en pasta: Depósito de relaves que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado, corresponde a una mezcla de relaves sólidos y agua (entre 10 y 25% de agua) que contiene partículas finas, menores de 20 micrones, en una concentración en peso superior al 15%, muy similar a una pulpa de alta densidad. Su depositación se efectúa en forma

similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación, poseyendo consistencia coloidal.

l) Relaves espesados: Depósito de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminándole una parte importante del agua que contienen. El depósito de relaves espesados deberá ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado y contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente.

m) Relaves filtrados: Depósito de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de filtración, mediante equipos especiales de filtros, donde se asegure que la humedad sea menor a un 20%. Deberá asegurarse que el relave así depositado no fluya a otras áreas distintas a las del lugar determinado.

n) Tranque de relaves: Aquel depósito de relaves donde el muro de contención es construido con la fracción más gruesa del relave (arenas)

Artículo 619: Será responsabilidad de la Empresa Minera tapar o cercar y advertir sobre los piques, taludes, bancos, depósitos de relaves, y otros depósitos de residuos masivos mineros, tanto en actividad como fuera de servicio (Fuente: Normativa de Seguridad Minera, Sernageomin).

Conociendo todos los conceptos sobre relaves, debemos comprender los Aspectos Técnicos de los Proyectos de Plan de Cierres (de Depósitos de relave), para el momento de cierre de la faena, se deben aplicar algunas medidas:

- Secado de lagunas de aguas claras.
- Mantención de canales perimetrales.
- Sistema de evacuación de aguas lluvias.
- Cierre de accesos.
- Estabilización de taludes (sismo máximo).
- Señalizaciones
- Habilitación de vertedero de emergencia (diseño máxima crecida probable).
- Cercado de torres colectoras.
- Instalación de cortavientos.

- Compactación de berma de coronamiento.
- Piscinas de emergencia (evaporación).
- Medidas de reparación.

En términos generales, los Tranques, Embalses y todo tipo de Depósitos de Relaves deberán considerar, cuando corresponda el caso, las siguientes medidas para cumplir con la normativa vigente:

a) Desmantelamiento de instalaciones (al término de la faena): Desarme y retiro de ductos de relaves, bombas, hidrociclones, líneas y postaciones eléctricas, muelles de acceso, etc.

b) Mantención de canales perimetrales: Dejar operativos los canales perimetrales y/o zanjas de desvío de escorrentías superficiales.

c) Sistema de evacuación de aguas: Secado de lagunas de aguas claras. Cuando exista presencia de agua en la superficie de los depósitos de relaves estas deberán ser evacuadas, ya sea por extracción, drenaje, etc. Habilitación de sistemas que permitan la evacuación de aguas lluvias desde la cubeta. (a través de sifones, canales, etc.)

d) Compactación de berma de coronamiento: Esparcimiento del material del muro y compactación de este, para obtener mayor resistencia.

e) Cierre de accesos: Bloquear el paso de vehículos, personas y animales, mediante la construcción de bermas, zanjas, muros, camellones, pretiles o pedraplenes.

f) Cobertura de cubeta y taludes: En casos justificables para el caso de cierre final de Tranques y pequeños Embalses, si la humedad de la superficie no es suficiente para evitar la emisión de material particulado y la dispersión de los relaves, se deberá establecer algún tipo de cobertura, tal como: Cubrimiento con material granular, que sea adecuado para evitar la erosión eólica.

g) Señalizaciones: Es importante la instalación de señales que adviertan de los riesgos del lugar, que aporten información de las instalaciones que operaron en esa zona y prohíban el ingreso, etc.

h) Construcción de obras de protección al pie del talud: Se deben levantar pretiles de contención, utilizando estériles o material de empréstito, que permitan contener derrames ante eventos naturales extremos, como sismos o crecidas.

La ley es muy clara ante lo que son las mantenciones y especificaciones de cada particularidad en contexto de la temática de depósitos de relaves, esto nos ayuda a comprender el nivel de riesgo de un depósito, los materiales que se requieren en el diseño de la estructura, los parámetros que debe resistir cada parte y las opciones de cuidado que se pueden adoptar al momento del cierre y abandono de una faena, para no causar ningún daño medioambiental.

CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN BASE.

3. EXPERIMENTACIÓN BASE.

3.1. MEDICIONES EXPERIMENTALES

Para llevar a cabo las mediciones experimentales del trabajo, se requiere del estudio del pH, acrónimo de potencial de hidrógeno, que indica la concentración del ión hidronio en una solución, es el parámetro más importante que considerar en el relave que se trata con carbonato de calcio y cal.

$$pH = \log \frac{1}{[H_3O^+]}$$

Fuente: Fuentes, F. y Massol, A., 2002, Manual de Laboratorio, Ecología de Microorganismos, Segunda Parte, Parámetros Físico-Químicos: pH, UPR.

Ecuación 3-1. pH, dónde, $[H_3O^+]$ (Concentración del ión hidronio en moles/L).

El término pH expresa en términos simples la intensidad de un ácido, dependiendo de su capacidad de disociación, así como de su concentración. El agua es un electrolito débil, en consecuencia, sólo una pequeña fracción de ésta se disocia en los iones que componen la molécula: H_3O^+ (ión ácido) y OH^- (ión básico). La siguiente ecuación describe el equilibrio de disociación del agua.

$$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-$$

$$H_2O + H^+ + OH^- \leftrightarrow H_3O + OH^-$$

Fuente: Fuentes, F. y Massol, A., 2002, Manual de Laboratorio, Ecología de Microorganismos, Segunda Parte, Parámetros Físico-Químicos: pH, UPR.

Ecuación 3-2. Balance de reacción de la molécula H en presencia de agua.

3.1.1. Importancia ecológica

El pH de un cuerpo de agua es un parámetro a considerar cuando queremos determinar la especiación química y solubilidad de varias sustancias orgánicas e inorgánicas, como lo son la solubilización de los metales pesados en un tranque o el comportamiento de disociación de la cal, para llegar a todas las moléculas ácidas a ser neutralizadas.

Es un factor abiótico que regula procesos biológicos mediados por enzimas (ej. fotosíntesis, respiración); la disponibilidad de nutrientes esenciales que limitan el crecimiento microbiano en muchos ecosistemas (ej. NH_4^+, PO_4^{-3} y Mg_2^+); la movilidad de metales pesados tales como cobre, que es tóxico para muchos microorganismos; así como también afecta o regula la estructura y función de macromoléculas y organelos como ácidos nucleicos, proteínas estructurales, sistemas de pared celular y membranas.

Las variaciones en el pH pueden tener entonces efectos marcados sobre cada uno de los niveles de organización de la materia viva, desde el nivel celular hasta el nivel de ecosistemas, evidenciado en la actualidad en la acidificación de ambientes completos, produciéndose la lluvia ácida.

La Minera Migrin que facilitó el material de relave para el trabajo experimental, se dedica a la extracción mayoritariamente de cuarzo y sílice certificada (ver en anexos) para la comercialización como materia prima para la producción del vidrio, con plantas en el sector de San Sebastián y Lo Zarate, en la quinta región de Valparaíso, y en la actualidad extraen también otros metales con valor comercial tales como: Hierro, titanio, aluminio y calcio.

Los desechos que se generan del lavado y extracción de los metales mencionados son depositados en tranques hechos con material de empréstito en los cerros de la localidad de San Sebastián, en pendiente, lo que le da sus características de embalse de relaves aguas abajo, además del tubo de evacuación de aguas subterráneas que se ve en el exterior del depósito (Ver fotos en Anexos).

Al estar en el lugar, se observaba una separación entre las aguas claras y los desechos viscosos al fondo del embalse, también se podía ver el daño ambiental alrededor de esta construcción, puesto que al diseñar el socavón del depósito se

arrastrarón algunos árboles al interior, los que pasaron de ser verdes a tonalidades rojizas y café.

Pudiendo comprobar en terreno que la acidez de las aguas del relave eran el causante de este cambio en las plantas (la medición en el lugar arrojó pH=4), que, al absorber el agua contenida por el relave con metales disueltos, no soportaban la acidez y/o concentraban metales hasta secarse.

La experimentación que se realizó en el laboratorio consistía en conminuir a través de un chancador de mandíbulas el carbonato de calcio extraído de la Mina Blanco 3, para generar una granulometría homogénea de adición en el relave de Migrin, separando cada uno de los niveles de pureza de las rocas (alta, media y baja) en potes de plástico separados. Después, se pasó cada uno de los productos obtenidos por tamices del orden de 3350 y 150 micrones, para separar los gruesos y finos.

Paralelo a esto, al relave se le debían hacer pruebas de pH inicial y concentración de sólidos, para tener las características y parámetros de trabajo, y posteriormente, aplicar el carbonato de calcio en diferentes cantidades (0,5, 1 y 2 gramos) v/s la adición del óxido de calcio o cal viva, a porciones de relave, observando su comportamiento a través del pHmetro y esperando periodos de tiempo de cinco minutos para tener resultados óptimos (tomando en cuenta que al agregar un producto básico a una solución ácida, toma su tiempo en consumirse).

3.1.2. Materiales utilizados en el laboratorio

- ✓ Chancador de Mandíbulas.
- ✓ Potes de plástico.
- ✓ Pala y brocha.
- ✓ Horno.
- ✓ PHmetro.
- ✓ Vasos precipitados de 1L.
- ✓ Pesa digital.
- ✓ Varilla de vidrio.
- ✓ Guantes de nitrilo.
- ✓ Mascarilla.
- ✓ Bandejas de aluminio.
- ✓ Tamices.
- ✓ Pizeta con agua destilada.
- ✓ Óxido de calcio. (cal)

3.2. PROCEDIMIENTO DE LA EXPERIMENTACIÓN

1) Se conminuye el carbonato de calcio por medio del chancador de mandíbulas del laboratorio.

2) Se recolecta y separa en potes de plástico (3), según la pureza del mineral chancado.

3) Cada pote con distinto carbonato de calcio fue pasado por tamices (de abertura 3350 micrones y 150 micrones, uno sobre otro, respectivamente). Dejando separados gruesos y finos, para la adición de finos en el relave.

4) Paralelamente, se midió el pH inicial del relave extraído de minera Migrin con pHmetro.

5) Se pesaron 661,5 ml de relave en una bandeja de aluminio y se dejó en el horno por 72 horas, a 60°C para la evaporación del agua.

6) Luego, se vertió relave en un vaso precipitado de 1 L, y se pesaron varios montículos de 0,5, 1,0 y 2,0 gramos de carbonato de calcio.

7) Se adicionó cada montículo, hasta regular el pH de la solución a pH = 8, revolviendo con la varilla de vidrio.

8) Se detuvo la adición cuando el pH se mantuvo constante en 8.

9) Se repitieron los pasos 7 y 8, adicionando diferentes reactivos (carbonato de calcio de alta pureza, mediana y baja, y aparte, cal viva u óxido de calcio). Se registraron los tiempos y observaciones de cada prueba realizada.

3.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

PESOS:

- Bandeja de aluminio = 13,3 g.
- Bandeja con relave = 674,8 g.
- Bandeja con relave pasadas las 72 horas en el horno = 151,1 g.
- Vidrio de Reloj = 39 g.
- Vaso precipitado de 1L. = 271,1 g.

Para conocer el porcentaje de sólidos y agua contenidos en el relave, se hace una prueba simple de concentración, poniendo en una bandeja de aluminio 661,5 g de relave, los que fueron llevados al horno, se programó para estar 72 horas a una temperatura de 60°C para luego, sacar el relave seco, pesarlo nuevamente, y así saber el porcentaje de agua que poseía el relave, determinando su respectiva concentración.

Antes de comenzar con las mediciones de pH se recomienda calibrar el instrumento (pHmetro) para obtener resultados que sean confiables en cada experimentación, esto se hizo a base de una solución buffer (ver en anexos) en el laboratorio de la Utfsm que ya estaba en pH=7, dejando el electrodo sumergido por 3 segundos, y apretando el botón CAL en la máquina. Así se calibró el equipo y se comenzó a medir.

3.3.1. Experimento 1

En un vaso precipitado de 1L tenemos relave, el pH inicial de la medición es de 3,65 a temperatura ambiente de 25°C medido con el pHmetro, se le adiciona 0,55 g de carbonato de calcio de alta pureza (el que estaba más blanco a simple vista) y se revuelve por cinco minutos con la varilla de vidrio, midiendo nuevamente el pH, que esta vez arrojó 4,41, al adicionarle 1 g más de carbonato de calcio y revolver cinco minutos más llegó a 6,38, repitiendo el proceso hasta llegar con 2 g más a pH=8,48 constante.

Tiempo total = 15 min.
Carbonato de calcio total empleado = 3,55 g.

3.3.2. Experimento 2

Se tiene relave en un vaso precipitado de 1L, se le mide el pH inicial de 4,09 a temperatura ambiente de 25°C, se le añade 1g de carbonato de calcio de mediana pureza (visualmente más opaco), y al revolver por cinco minutos se llega a un pH=5,92, repitiendo el procedimiento hasta nivelar el pH=8,55 constante.

Tiempo total = 20 min.
Carbonato de calcio total empleado = 4,9 g.

3.3.3. Experimento 3

Al vaso precipitado de 1L con relave se le adiciona carbonato de calcio de baja pureza (totalmente opaco), en intervalos de cinco minutos, revolviendo, obteniendo un pH inicial de 3,72 hasta llegar a pH=8,12 constante.

Tiempo total = 25 min.
Carbonato de calcio total empleado = 7 g

3.3.4. Experimento 4

Se repite el procedimiento con el mismo volumen de 1L de relave, a un pH inicial de 5,17, se le adicionó óxido de calcio tratado conocido como cal viva, en periodos de cinco minutos, revolviendo y midiendo los pH hasta llegar a 8,33 constante.

Tiempo total = 5 min.
Cal viva total empleada = 1 g.

La razón de velocidad de reacción de la cal v/s el carbonato de calcio en el relave como modificador queda establecida de 1:3, ya que se demoró 5 minutos la cal en actuar nivelando el pH de la solución desde el nivel ácido a básico constante del orden 8, en comparación a los 15 minutos que demora el carbonato de calcio en bruto, ocupando además una mayor cantidad de reactivo por el contenido alto de impurezas.

(Todas las experimentaciones fueron respaldadas por material fotográfico adjunto en los anexos.)

Para calcular la concentración de sólidos, se pesó el relave en una bandeja de aluminio lo que dio un total de = 674,8 gramos y al dejarlo en el horno por 72 horas, se evaporó el agua contenida, al pesarla de nuevo midió = 151,1 gramos, desprendiéndose de estos datos, el resultado de = 523,7 gramos de agua evaporada.

Esto nos ayuda a realizar el cálculo de porcentaje de sólidos. El porcentaje de sólidos de una pulpa es la razón entre el peso de los sólidos entre el peso de la pulpa dada por:

$$C_p = \frac{Peso\ del\ sólido\ seco}{Peso\ de\ la\ pulpa\ de\ relaves} \cdot 100\ [\%]$$

Fuente: Olivares, I. 2014, Estudio de la fluidodinámica de relaves de diferentes concentraciones en cajones de distribución, Universidad de Chile.

Ecuación 3-3. Cálculo de concentración de sólidos en relave.

Cp = (137,8 g. / 661,5 g.) * 100 = 20,83% de sólido contenido en el relave.

Por lo tanto, el sólido contenido en el relave es de 20,83% y su contenido de agua es de 79,17%, dejándolo a partir de estas características, dentro de la clasificación de relave convencional por tener menos del 40% de sólidos contenidos en la pulpa del relave, la que se observaba en una separación de las aguas claras en el embalse en San Sebastián.

Si el porcentaje de sólidos es, por ejemplo, el 45% significa que el 45% del peso total de la pulpa de relave es sólido (roca) y el otro 55 % es el peso del agua.

A mayor porcentaje (%) de sólidos mayor es la tasa de recuperación o de recirculación de agua que se puede obtener del sistema, y menos es el escurrimiento de los metales contenidos en el relave en forma de sólidos hacia el medio.

En los depósitos de relaves actualmente en operación existen varios sistemas de monitoreo, entre los cuales destaca el Piezómetro, que permite controlar los niveles de agua al interior del muro.

Otras tecnologías de instrumentación y medición incluyen Acelerógrafo, Inclinómetro, Visión Artificial, Análisis de Imágenes Satelitales, y diversas tecnologías que permiten acceder a información de estabilidad física y química.

Las medidas que se adoptan para evitar que colapsen los depósitos de relaves, se implementan antes de permitir que se instale un depósito de relaves en alguna parte, se examina rigurosamente su diseño. En seguida, se verifica la correcta construcción y operación, que debe cumplir normas precisas de seguridad y estabilidad.

En términos prácticos, se adoptan varias medidas, como mantener los muros compactados, no saturados, con una cantidad baja de finos y sistema de monitoreo en los muros, compromisos que la empresa debe adoptar durante las etapas de diseño para tomar la responsabilidad de la correcta depositación de sus residuos.

Se recupera agua a través de la laguna de aguas claras y piscinas de recolección de infiltraciones y drenajes, para optimizar el uso del recurso hídrico.

Para escoger el lugar adecuado donde depositar los desechos de relave se debe considerar la zona más ventajosa que se pueda y las mejores condiciones que permitan la contención total del relave, tales como: Suelo competente y de características adecuadas de impermeabilidad, relieve que permita una buena construcción del muro, y la resistencia a las adversidades climáticas, que permitan confinar el relave en forma segura, evitando su contacto con ecosistemas y las personas circundantes.

También se debe considerar el ambiente que rodea el lugar de diseño del tranque, si hay arboles protegidos, deben ser removidos y eso implica costos mayores que la remoción de tierra para generar un terreno estable para la estructura de depósito.

Debemos recordar que, un depósito de relaves que no cumpla la normativa vigente puede contaminar y el objetivo de los depósitos de relaves es contener los sólidos, impidiendo impactos ambientales y específicamente, impedir la contaminación.

Si los metales contenidos en los sólidos del relave se disuelven, pueden generar contaminación química.

Los relaves depositados y mal mantenidos pueden generar ácido sulfúrico, el que a su vez puede disolver metales tóxicos procedentes de los minerales del relave depositado.

En una explicación más extensa, los minerales son estables en contacto con aguas neutras, que su pH esté en torno de 7.

Si las aguas son ácidas, en cambio, se pueden disolver los metales pesados contenidos, liberando en solución sus elementos componentes, que podrían ser contaminantes en concentraciones para el entorno.

Se busca evitar los derrames que se producen frecuentemente, no tan solo en las zonas de tranques y embalses, también en el área de canaletas que conducen los residuos al depósito final, todo el trayecto debe ser resguardado para evitar las filtraciones al entorno. Así se mantienen los contaminantes confinados.

3.4. PENDIENTE DE DEPOSITACIÓN DEL RELAVE

En el proceso de evaluación de métodos que nos ayuden en la depositación del relave y evitar que los contaminantes salgan del embalse, tenemos diferentes pendientes que se pueden emplear en esta labor, una de ellas es el estudio de la pendiente.

La pendiente de depositación es en función de la granulometría, concentración de sólidos, pH, contenidos de arcillas o limos y otras variables independientes. Predecir la pendiente requiere laboratorio y /o pruebas pilotos para observar el comportamiento en terreno del flujo de relave que se está llevando al depósito.

Existen varios tipos de depositación, los cuales dependen de la morfología del terreno donde se emplace el depósito.

La rápida consolidación del relave dependerá, de que tan rápido llegue el depósito a su límite de contracción solo por evaporación del agua contenida. Esto

dependerá de una adecuada área de evaporación que se concentre en una parte de amplia área en dirección al sol.

Debido a lo anterior se hace necesario un buen diseño de llenado del depósito donde se maximice el área de evaporación y el volumen de llenado por día, teniendo en cuenta las mantenciones frecuentes de equilibrio químico (pH).

3.5. GEOQUÍMICA DE DEPÓSITOS DE RELAVES

Es posible estimar la masa total de elementos formadores de la roca original, a partir de la determinación cuantitativa de 11 Elementos mayores, expresados como óxidos de: silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), titanio (TiO_2), hierro (Fe_2O_3), calcio (CaO), magnesio (MgO), manganeso (MnO), sodio (Na_2O), potasio (K_2O). fósforo (P_2O_5), azufre (SO_3) y pérdida por calcinación (PPC, esencialmente carbonatos).

La estabilidad química de un relave se consigue evitando la generación de ácido en el depósito. La respuesta formal es que los relaves que tienen capacidad de generación de ácido siempre van a generar acidez a largo plazo.

Si se genera acidez, se van a lixiviar metales pesados, que resultan tóxicos para el ecosistema y para la población. La forma de asegurar la estabilidad química se suele presentar de varias formas:

- Relave inocuo: Esta solución consiste en retirar las especies valiosas, las especies contaminantes y las especies generadoras de ácido, antes de depositar los relaves (remoción de tóxicos y Pirita). La remoción de sulfuros (como la Pirita) es un proceso conocido en la minería (flotación a pH neutro), esto generaría un residuo líquido sin contaminantes y se podría depositar en cualquier parte sin ser reactivo.

- Diseño operacional del depósito: Dependiendo del yacimiento explotado, es posible diseñar el Plan Minero (la forma de explotación del yacimiento) de modo que los sectores generadores de ácido se depositen alternadamente con sectores con capacidad de neutralización de ácido, como lo son las calizas (carbonato de calcio).

- Inundación del depósito: Esta solución puede servir para Embalses de Relaves, en que el muro puede sostener las aguas por diseño. La solución funcionaría porque la tasa de trasferencia de oxígeno de la atmósfera produce ácido a velocidades suficientemente bajas como para evitar acidez extrema (con la consecuente lixiviación de tóxicos).

- Aislación impermeable de la superficie del depósito: Esta solución funciona si se impide la llegada de agua al sólido del relave, se produce el confinamiento total del relave, deteniendo efectivamente las reacciones que producirían ácido y lixiviación de tóxicos. La capa impermeable superior sería de arcillas muy finas y se desarrollarían, además, canalizaciones que permitan el libre rápido flujo de agua hacia abajo del depósito aislado. Sobre estas capas de aislación impermeable se podría agregar humus (tierra de hojas) para forestar, con especies cuyas raíces no puedan romper la capa aislante.

- Desarrollo de biomasa sobre el depósito de relaves: Si un depósito de relaves no contiene metales tóxicos ni capacidad de generación de ácidos, se considera la opción del desarrollo de vegetales, después de agregar una capa de humus, resulta atractivo y es un cierre adecuado cuando se puede disponer de agua de riego.

Si el relave depositado contiene tóxicos en sus minerales, esta posibilidad es válida sólo para depósitos adecuadamente impermeabilizados, ya que el desarrollo de vegetales en minerales que contienen tóxicos moviliza dichos tóxicos en cadenas de bioacumulación, que afectan a enormes distancias el ecosistema, tanto por los vegetales como por la población bacteriana que se desarrolla en torno de las raíces de vegetales. Existe, además, la posibilidad de que las raíces puedan romper la capa impermeable.

No subsisten los vegetales a depósitos con capacidad de generación de ácido, estos dejan de operar, pero al recibir agua (lluvias, escorrentías, vertientes, afloramiento de agua al interior del depósito, etc.) pueden activarse y contaminar durante siglos, secando la flora de alrededor.

Entre más espesado sea un relave y contenga menos agua, menos escurrimiento produce, lo que es beneficioso para que no se filtre en el medio que lo rodea, la serie de contaminantes contenidos.

Con esto la flora y fauna no son lo único que se protege al prepararnos en cuanto a seguridad en la estabilidad de los depósitos de relave, también se cuidan las vidas humanas que se desempeñan realizando los trabajos de monitoreo constante y de supervisión de las estructuras.

Según la ley 19.300 de bases del medio ambiente, todos tenemos derecho a desenvolvernos en un ambiente libre de contaminación, es una tarea social apoyarse en conjunto para cuidar los recursos y convivir con los residuos generados, haciéndose responsable antes, durante y después del cierre de un tranque o depósito de relaves.

La superficie de un depósito de relaves seco se convierte en material molido, este material puede ser arrastrado por vientos, si los hubiese. La composición del material arrastrado eólicamente desde la superficie será un reflejo de la composición de la superficie del Depósito de Relaves que allí existió.

Estos datos se deben conjugar con modelos de dispersión y climatológicos para determinar si pueden afectar a poblaciones aledañas y así convivir con la Comunidad.

Ejemplos comunes de contaminantes arrastrados por movimiento eólico: Mercurio, Cadmio, Plomo, Níquel y Arsénico.

La gestión de la estabilidad química tiene lugar a lo largo de todo el proyecto minero, desde la exploración hasta muchos años después del cierre de faena.

Entonces no es sólo la acidez, naturalmente, la que podría producir contaminación sino también el movimiento de las partículas secas por arrastre, además, existe la movilización de metales lixiviados, desde el depósito de relaves hacia el ecosistema por filtraciones ciegas bajo el depósito.

Estos pueden infiltrar a las napas o a cauces superficiales, dicha infiltración podría ser ácida, a partir de sulfuros de metales, en oxidación acuosa.

Una gran diversidad de sulfuros de metales y metaloides se lixivian (disuelven) en presencia de ácido.

Las aguas de un depósito de relaves contienen, al menos en las pruebas realizadas, todos los metales y metaloides que existen en los minerales del relave.

Al elevar posteriormente el pH (mitigación o neutralización) permanecen en solución los metaloides As, Se y Sb, además de otros metales en pruebas concordantes (Cu, Cd, Cr, Mn, Mo y Zn) que resultan tóxicos en concentración.

La composición geoquímica o mineralógica de los depósitos de relaves actuales, abandonados o en operación, no suele ser considerada.

Sin embargo, esta información es importante para evaluar alternativas al cierre (Desarrollo de minería secundaria, Reorganización de contenidos del depósito, Encapsulación de sectores generadores de ácido, etc.)

Por ejemplo: En una mina canadiense (Diavik) se clasificó el relave según sulfuro total, como azufre, S, dando los resultados:

- Por sobre 0,08% de S era generador potencial de ácido.
- Entre 0,02 y 0,08% era de potencial incierto.
- Bajo 0,02% no era generador de ácido.

(Fuente: Datos del Servicio Nacional de geología y minería (Sernageomin), agosto 2016, situación de los relaves mineros, departamento de depósitos de relave, Gob. De Chile).

3.6. RIESGO DE COLAPSO

Los efectos de los depósitos de relave no terminan con la contaminación, lo a demostrado la historia con las catástrofes ocurridas por depósitos de relaves cobrando vidas. El colapso de sus estructuras se configura como uno de los temores más grandes de las comunidades que serían afectadas, sobre todo tomando en cuenta la sismicidad del país.

Gran parte de los depósitos que no cuentan con información detallada hoy se encuentran en desuso y abandonados. Nadie se hace cargo de sus efectos y en la medida que pasa el tiempo incrementan el peligro que significan para la población y el medioambiente. En el norte del país, son 121 los tranques de los que no se posee

información (Fuente: Equipo El Desconcierto, 2015, Relaves mineros: los desechos tóxicos de la gran industria que amenazan con sepultarnos, Diario en línea El Desconcierto).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la experimentación realizada en el laboratorio, se comprueba la elección mayoritaria a nivel industrial de las empresas mineras de tratar sus relaves con un reactivo como la cal viva pasada por calcinación, ya que resulta ser más rápida en reaccionar nivelando el pH ácido a básico en menos tiempo (5 min.) en comparación al carbonato de calcio en bruto con alta pureza (15 min.), con la experimentación se verificó que tarda tres veces más que una piedra caliza pasada por hornos de calcinación o cal viva, esto se debe a la interferencia de un alto contenido de impurezas que contiene el carbonato de calcio en bruto en forma de roca mineralizada.

Aunque el carbonato de calcio podría verse como una opción más económica para la minería de mediana y baja envergadura a la que no le apremia el tiempo porque produce bajos volúmenes de relaves; pudiendo depositar sus desechos de forma segura y no reactiva en instalaciones bien estructuradas con un bajo costo de reactivos. Demoraría más tiempo en reaccionar, pero no es tan apremiante en la regulación de poco volumen de relave.

En el ámbito regulatorio a corto plazo se debe mantener en constante monitoreo los relaves y sus respectivos depósitos que estén en una faena, ya que pueden llegar a ser fiscalizados por personal del Sernageomin dentro del cumplimiento de las normas dictadas por el Decreto Supremo 248, y lo referido a las Normativa de Seguridad Minera, en el Reglamento del Departamento de Depósitos de Relave del Sernageomin y las entidades gubernamentales de apoyo general para el cuidado del medio ambiente, estando preparados para eventualidades como los movimientos sísmicos que frecuentan nuestro país, con el constante equilibro de la reactividad de sus residuos industriales líquidos (RILes).

Al concluir los estudios del relave de Minera Migrin, se aporta información importante que la empresa desconoce, en cuanto a la regulación de sus residuos, poniéndola al tanto de la acidez de su relave, para tomar cartas en el asunto y lograr un contenido amigable con el entorno de bosque que se mantiene alrededor de estas

estructuras de depósitos en los cerros de San Sebastián, en la quinta región de Valparaíso.

A pesar del bajo precio estimado del carbonato de calcio el año 2017 de 32 dólares la tonelada métrica, en contraste al de la cal viva de 52 dólares la tonelada métrica, a simple vista atractivo económicamente, se pudo comprobar que se necesita menos reactivo (en proporción 1:3) cuando se ocupa el óxido de calcio que el carbonato de calcio y que actúa en menor tiempo, regulando las concentraciones del relave depositado más rápido a pH=8 constante.

Como recomendación, invertir en el proceso de calcinación del carbonato de calcio en hornos, para generar un óxido de calcio puro, es más rentable, que pagar por el triple de reactivo de baja calidad con un considerable contenido de impurezas que entorpecen la misión de estabilizar el pH.

Recordar que, al momento de la experimentación, se deben usar los elementos de protección personal para realizar los trabajos de chancado (zapatos de seguridad, lentes, protección auditiva y mascarilla por la emisión de polvo en suspensión), además de calibrar el pHmetro antes de usarlo, para obtener resultados confiables en la medición de los parámetros que se deben regular en el relave.

BIBLIOGRAFÍA

1. Educarchile, 12 de agosto del 2010, ‘’ ¿Cómo se produce el cobre chileno?’’, Ministerio de Minería de Chile.

2. Palma, J. Agosto 2016, Operación y control de tranques de relave, Seminario Minería Chilena y sus Desafíos: una visión integral, Universidad Católica de Chile.

3. Falcón, M. Junio 2017, Departamento de Depósitos de Relave, Sernageomin.

4. Minera Las Cenizas, Agosto 2006, Los Relaves, Gerencia Operaciones Cabildo.

5. Lara, J. 2013, Experiencias de operación de depósitos de relaves espesados y filtrados, Asociado, Líder del Grupo Geotécnico de Relaves.

6. Decreto Supremo Nro. 248, sobre Diseño, Construcción, Operación y Cierre de depósitos de relave, Sernageomin.

7. Servicio Nacional de geología y minería (Sernageomin), agosto 2016, situación de los relaves mineros, departamento de depósitos de relave, Gob. De Chile.

8. Arunakumara, K. Xuecheng, Z. Song, X., 2007, Estudio comparativo de la bioacumulación del Plomo y Cadmio en cianobacterias Synechocystis sp. PCC 6803 bajo condiciones de laboratorio, Ciencias Marinas, vol. 33, núm. 3, pp. 271-280, Universidad Autónoma de Baja California.

9. M. Santander, M. Paiva, R. Silva, J. Rubio; (2011), ‘’Tratamiento de riles del sector minero-metalúrgico y reutilización de las aguas’’, Departamento de Metalurgia, CRIDESAT, Universidad de Atacama, Chile.

10. Ancade, consultado Junio 2018, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España. [en línea]

11. Anfacal, consultado Junio 2018, Datos Técnicos de la cal y sus derivados. [en línea]

12. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) [en línea]

13. Ramírez, N. Diciembre 2007, Guía Técnica de operación y control de depósitos de relave, Departamento de Seguridad Minera, Sernageomin.

14. Bernal, M. Diciembre 2012, Estabilidad sísmica en presa de relave construida por el método de eje central, Universidad de Chile, Santiago.

15. Fuentes, F. y Massol, A., 2002, Manual de Laboratorio, Ecología de Microorganismos, Segunda Parte, Parámetros Físico-Químicos: pH, UPR.

16. Olivares, I. 2014, Estudio de la fluidodinámica de relaves de diferentes concentraciones en cajones de distribución, Universidad de Chile.

ANEXOS

ANEXO A: CERTIFICADO DE MINERA MIGRIN

DNV·GL

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATE

Certificate No:
166683-2014-AQ-ARG-RvA

Initial certification date:
11 December, 2011

Valid:
11 December, 2014 - 11 December, 2017

This is to certify that the management system of

Procesadora y Comercializadora de Minerales y Granos Industriales Migrin S.A.

Camino a lo Abarca s/nº,El Tabo,Cartagena,Chile

has been found to conform to the Quality management system standard:

ISO 9001:2008

This certificate is valid for the following Scope:

Production and control of quartz and of silica sand for the glass industry, for production of fiber cement, plaster, ceramics, foundries and others

Producción y control de cuarzo y de arenas siliceas para la industria del vidrio, como también para las actividades de producción de fibrocemento, morteros, cerámicas, fundiciones y otras.

Place and date:
São Paulo, 09 December, 2014

MGMT. SYS.
RvA C 024

The RvA is a signatory to the IAF MLA

For the issuing office:
DNV GL – Business Assurance
Av Alfredo Egydio de Souza Aranha, 100 - Bloco D- 3ºandar - Vila Cruzeiro, São Paulo, SP, Brazil

Adriano Duarte
Regional Manager

Lack of fulfilment of conditions as set out in the Certification Agreement may render this Certificate invalid.
ACCREDITED UNIT: DNV GL Business Assurance B.V., Zwolseweg 1, 2994 LB, Barendrecht, The Netherlands. Tel.: +31102922689. www.dnvba.com

Certificado de Minera Migrin, la que aportó el relave para el trabajo experimental.

ANEXO B: FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO

Imagen 1 : Contaminación de aguas evidenciada por el color de los arboles rojizos.

Imagen 2 : Depósito de relave Minera Migrin
Imagen 3 : Tubería de evacuación de aguas de relave.

Imagen 4 : Estabilización de relaves antiguos con plantas.
Imagen 5 : Borde del tranque de material empréstito.

Imagen 6 : pH inicial tomado en el tranque, del orden ácido de 4.

Imagen 7 : Relave para prueba de concentracion de sólidos.
Imagen 8 : Sólido seco pasadas las 72 horas en el horno.

Imagen 9 : Horno a T° inicial calentando a 40°C.
Imagen 10 : Horno a T° final de 60°C.

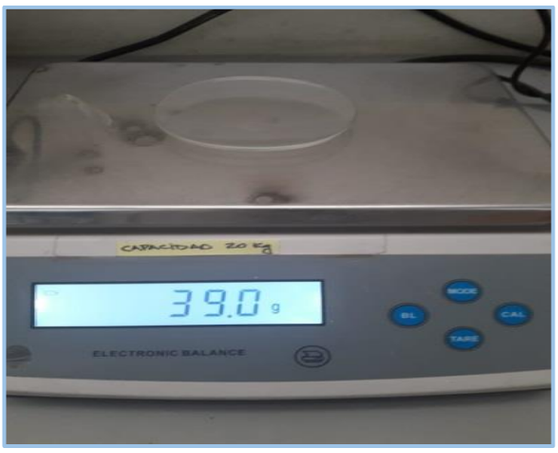


Imagen 11 : Peso del vidrio de reloj.
Imagen 12 : Peso vaso precipitado 1L

Imagen 13 : Chancador de mandibulas.
Imagen 14 : Carbonato de calcio de alta pureza, mas blanco.

Imagen 15 : Carbonato de calcio de mediana pureza, mas opaco.
Imagen 16 : Carbonato de calcio de baja pureza, totalmente opaco.
Imagen 17 : Tres tipos de carbonatos de distintas purezas chancados.

Imagen 18 : Tamices a emplear.
Imagen 19 : Carbonato de calcio pasado por tamices, separado de lo mas grueso.
Imagen 20 : Carbonatos de calcio tamizados, sin la parte mas gruesa.

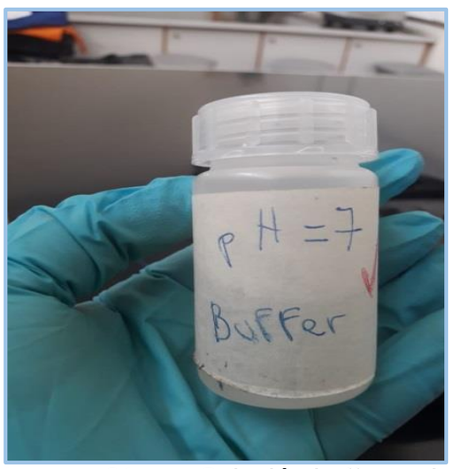


Imagen 21 : Solución buffer a ph=7 para calibrar phmetro.
Imagen 22 : Calibración del phmetro.

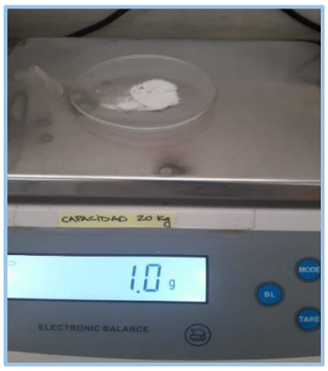
Imagen 23 : pH inicial de experimentación 1.
Imagen 24 : Carbonato de calcio adicionado.
Imagen 25 : Revolviendo el reactivo añadido en el relave con varilla de vidrio.

Imagen 26 : pH medicion exp.1
Imagen 27 : Peso carbonato calcio alta pureza.
Imagen 28 : pH medicion exp.1

Imagen 29 : Reactivo añadido.
Imagen 30 : Medición ph constante alcanzado en 8,48.
Imagen 31 : pH inicial exp. 2.

Imagen 32 : Reactivo Carbonato de calcio mediana pureza.
Imagen 33 : pH medicion exp.2
Imagen 34 : pH constante alcanzado a pH=8,55.

Imagen 35 : Carbonato de calcio de baja pureza (opaco).
Imagen 36 : Montículos de reactivo.
Imagen 37 : Pesaje de reactivo para adicionarle al relave.



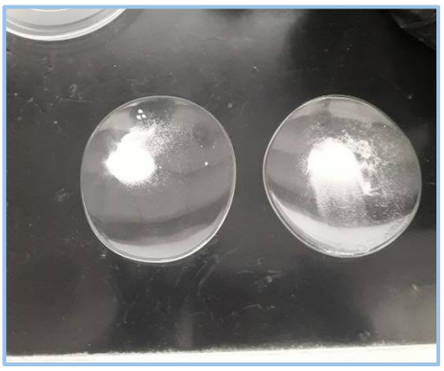
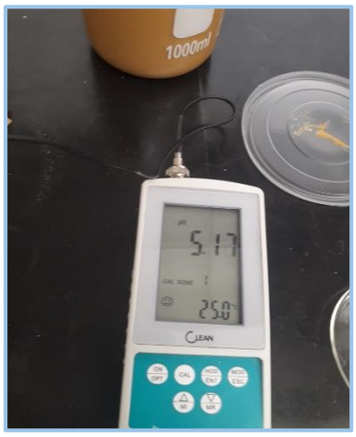
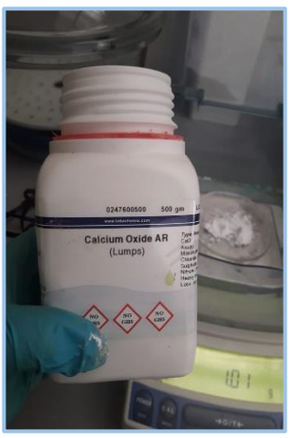


Imagen 38 : Pesaje de reactivo exp.3
Imagen 39 : Carbonato de calcio baja pureza.
Imagen 40 : Medición de pH exp.3.





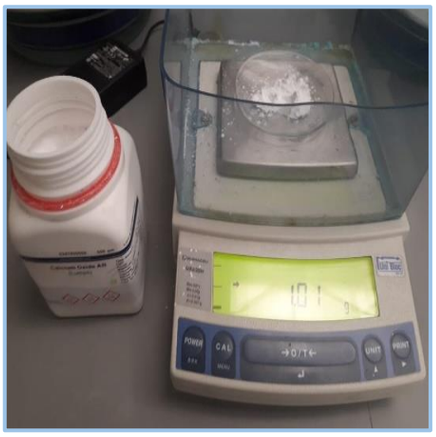


Imagen 41 : Medicion de ph inicial exp.4
Imagen 42 : Öxido de Calcio.
Imagen 43 : Reactivo para exp.4.