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

PRUEBA DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE HIERRO EN MINERALES SULFURADOS DE COBRE

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

Alumnos:
Andrea Belén Leiva Robles,
Nicolás Enrique Carrasco Saavedra

Profesor Guía:
Carlos Baldi González

Profesor Correferente:
Ítalo Piazze González

2017

ÍNDICE

RESUMEN
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA
INTRODUCCIÓN 1
OBJETIVOS 2
Objetivo general 2
Objetivos específicos 2

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE MINERALES

1.1. Principios del Magnetismo 4

1.1.1. Magnetismo 4
1.1.1.1. Imán 4
1.1.1.2. Polos Magnéticos 5
1.1.1.3. Campo Magnético 6
1.1.2. Electromagnetismo 6
1.1.2.1. Solenoide 6
1.1.2.2. Electroimán 7
1.1.2.3. Corriente Eléctrica 8
1.1.2.4. Histéresis Magnética 8
1.1.3. Magnitudes Magnéticas 8
1.1.3.1. Inducción Magnética 8
1.1.3.2. Flujo Magnético 9
1.1.3.3. Intensidad Magnética 9
1.1.3.4. Fuerza Magnetomotriz 10
1.1.3.5. Fuerza de Atracción Magnética 10
1.1.4. Permeabilidad Magnética 10

1.2. Propiedades Magnéticas 12

1.2.1. Minerales Estudiados 13
1.2.1.1. Calcopirita 13

1.2.1.2. Pirita 14
1.2.2. Ley de Curie 14

1.3. Separación Magnética de Minerales 15

1.3.1. Separación Magnética de Fragmentos Metálicos 16
1.3.2. Separación Magnética para Concentración y Purificación 16
1.3.2.1. Separación Magnética de Baja Intensidad 17
1.3.2.2. Separación Magnética de Alta Intensidad 17
1.3.3. Casos de Separación Magnética en Minerales 18
1.3.3.1. Concentración Magnética en Relaves de Cobre 18
1.3.3.2. Separación Magnética y Electrostática 18

CAPÍTULO 2. IMPLEMENTACIÓN DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN MINERALES SULFURADOS

2.1. Conminución del mineral 20
2.1.1 Selección de tamices 21

2.2. Primera prueba de separación magnética 22
2.2.1. Elaboración del electroimán 23
2.2.1.1. Dimensiones del núcleo 23
2.2.1.2. Determinación del número de espiras 23
2.2.1.3. Propiedades magnéticas del electroimán 25
2.2.1.4. Construcción del electroimán 26

2.3. Segunda prueba de separación magnética 27

2.4. Flotación de cobre 28
2.4.1. Reactivos de flotación 28
2.4.2. Composición de pulpa 30
2.4.3. Procedimiento de flotación 30

2.5. Tercera prueba de separación magnética 34

2.6. Cuarta prueba de separación magnética 36

2.7. Digestión ácida (DA) 38

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Resultados de análisis químico 40
3.1.1. Ley de cobre y hierro en las muestras 40
3.1.1.1. Ley de cobre 41
3.1.1.2. Ley de hierro 42
3.1.2. Análisis de resultados 43
3.1.2.1 Análisis de concentración de cobre 43
3.1.2.2 Análisis de concentración de hierro 44

3.2. Evaluaciones de resultados con separación magnética 45
3.2.1. Separación magnética con electroimán 45
3.2.2. Separación con agitador magnético 46
3.2.3. Factores que influyen en la separación magnética 47
3.2.3.1. Temperatura de las muestras 47
3.2.3.2. Tamaño de partículas 48
3.2.3.3. Fuerza centrípeta 49

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones 51

Recomendaciones 52

Bibliografía 53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Producción de hierro por región	1
Tabla 1-2.	Clasificación de minerales según su permeabilidad	13
Tabla 1-3.	Temperatura de Curie de algunos minerales ferromagnéticos	15
Tabla 2-1.	Serie de tamices utilizados en la experiencia	20
Tabla 2-2.	Dosificación en gramos por toneladas	29
Tabla 2-3.	Dosificación de reactivos calculados para la primera flotación	29
Tabla 2-4.	Dosificación de reactivos calculados para la segunda flotación	29
Tabla 2-5.	Sucesos ocurridos en la imantación del electroimán	35
Tabla 2-6.	Partículas magnética obtenidas en las muestras	37
Tabla 3-1.	Informe del análisis de hierro y cobre	40
Tabla 3-2.	Ley de cobre en las muestras	43
Tabla 3-3.	Ley de hierro en las muestras	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Partes de un imán	5
Figura 1-2.	Líneas de fuerza polo sur a polo norte	5
Figura 1-3.	Solenoide	7
Figura 1-4.	Ejemplo de electroimán	7
Figura 1-5.	Líneas de flujo magnético atravesando un medio susceptible	11
Figura 1-6.	Mena de calcopirita	14
Figura 1-7.	Mena de pirita	14
Figura 1-8.	Electroimán industrial suspendido	16
Figura 1-9.	Tambor rotatorio para vía húmeda	17
Figura 1-10.	Tubo Davis	18
Figura 2-1.	Mineral mixto con presencia de calcopirita y pirita	20
Figura 2-2.	Chancador de muelas Laboratorio	20
Figura 2-3.	Partículas finas de mineral chancado	21
Figura 2-4.	Serie de tamices utilizados	22
Figura 2-5.	Núcleo cilíndrico	23
Figura 2-6.	Contador de vueltas para bobinado	25
Figura 2-7.	Electroimán	26
Figura 2-8.	Electroimán tratando de imantar la muestra de mineral mixto	26

Figura 2-9.	Polvo de hierro reaccionando a la reacción magnética del electroimán	27
Figura 2-10.	Reactivos de flotación utilizados	28
Figura 2-11.	Acondicionamiento del mineral	31
Figura 2-12.	Incorporación de reactivos por medio de una micropipeta	31
Figura 2-13.	Arrastre de capa espumosa	32
Figura 2-14.	Acondicionamiento de la segunda flotación	33
Figura 2-15.	Rebalse progresivo de la segunda flotación	33
Figura 2-16.	Palastro de espuma en la segunda flotación	34
Figura 2-17.	Relave contenido en una bandeja de aluminio	35
Figura 2-18.	Leve movimiento de mineral en el electroimán	36
Figura 2-19.	Mezcla homogénea en agitador magnético	36
Figura 2-20.	Material ferroso recuperado en una muestra	37
Figura 2-21.	Digestión ácida de las 4 muestras	38
Figura 3-1.	Electroimán tratando de levantar partículas de hierro	45
Figura 3-2.	Imán de agitación magnética imantando hierro	46
Figura 3-3.	Imantación de hierro en la solución con temperatura	47
Figura 3-4.	Muestras de material en 125 micrones	48
Figura 3-5.	Líneas de fuerza centrífuga en el agitador	49

RESUMEN

Keywords: MINERALES SULFURADOS, HIERRO, SEPARACIÓN MAGNÉTICA.

La actividad minera en Chile está dominada por la extracción del cobre, en especial, cobre en minerales sulfurados; éstos cuentan con la presencia de diversos minerales llamados gangas, ya que carecen de valor económico y son descartados de los procesos metalúrgicos, siendo despojados en relaves y escorias. Uno de los minerales que se encuentran en la ganga es el hierro, el cual es el segundo metal más abundante de la corteza terrestre y fundamentalmente necesario en industrias de aceros.

Por ello, la investigación realizada tiene como principal objetivo el desarrollo de un estudio de factibilidad técnica en la separación de minerales, por medio del magnetismo en los procesos de concentrado para probar una alternativa de recuperación de hierro, sin afectar la concentración de cobre en los procesos metalúrgicos.

El estudio consta las propiedades del electromagnetismo y los fundamentos de la separación magnética en minerales. Con esto, se implementó la construcción de un electroimán para realizar las pruebas de magnetización en el posterior tratamiento de conminución del material sulfurado, tratamiento que requiere de un tamaño de partículas óptimas para ser sometido a los siguientes procesos productivos metalúrgicos. Seguido de esto, se realizó el proceso de flotación, el cual consiste en la separación selectiva del cobre por medio de reactivos. Del resultado de este proceso, se efectuaron otras pruebas de magnetización, con el mismo instrumento y luego, con la intervención de un agitador magnético. Posteriormente, se procedió a realizar el análisis químico de digestión ácida y absorción atómica para realizar las lecturas de recuperación de cobre y hierro de sus respectivos procesos.

Finalmente se obtuvieron los resultados de este estudio, que se presentan a continuación en este trabajo de título.

SIGLA

OSS	:	Apertura máxima
MSS	:	Apertura media
CSS	:	Apertura mínima
A	:	Área
B	:	Inducción magnética
$\mathscr{F}$	:	Fuerza electromotriz
E	:	Energía
μ	:	Permeabilidad magnética
μ_0	:	Permeabilidad del vacío
μ_r	:	Permeabilidad relativa
Φ	:	Flujo magnético
Tº	:	Temperatura
%	:	Porcentaje
S	:	Superficie

SIMBOLOGÍA

A	:	Ampere
Av	:	Ampere- vuelta
C	:	Coulomb
G	:	Gauss
g	:	gramo
mg	:	Miligramo
Kg	:	Miligramo
Kp	:	Kilopondio
H	:	Henrio
m	:	Metro
cm	:	Centímetro
mm	:	Milímetro
m^2	:	Metro cuadrado
m^3	:	Metro cúbico
µm	:	Micrómetro
N	:	Newton
T	:	Tesla
T_C	:	Temperatura Curie
ºC	:	Grado Celsius
L	:	Litro
mL	:	Mililitro
µL	:	Microlitro
s	:	Segundo
V	:	Volt

INTRODUCCIÓN

En Chile, la mayor producción de minerales es de cobre (Cu), siendo en su mayoría, la extracción desde minerales sulfurados, debido al agotamiento progresivo de los minerales oxidados. Sin embargo, desde su extracción hasta su procesamiento va acompañado de diversos minerales, llamados gangas, los que se desperdician en pasivos mineros como relaves y escorias.

Uno de estos minerales es el hierro (Fe), metal blanco grisáceo caracterizado por su gran ductilidad y maleabilidad. El hierro es sumamente necesario para fabricar fierro fundido y acero, materiales que a su vez conforman las estructuras de construcción habitacional y pública, obras civiles, industria manufacturera, automotriz y metal-mecánica, entre otros usos.

Los minerales que tienen mayor abundancia de hierro son los minerales oxidados como la magnetita (Fe_3O_4) con un 72,5% de hierro, la hematita (Fe_2O_3) con 55-66% de hierro, y los carbonatos de hierro como la siderita ($FeCO_3$) con 48,2% de hierro [1]. Su producción proviene de la gran y mediana minería en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. En la Tabla 1-1 se puede notar la producción de hierro por región productora.

Tabla 1-1. Producción de Hierro por región, según producción miles de toneladas métricas finas

AÑOS	TOTAL		Antofagasta		Atacama		Coquimbo	
	Mineral (tms)	(tmf)	Mineral (tms)	(tmf)	Mineral (tms)	(tmf)	Mineral (tms)	(tmf)
2006	8.629	5.235	-	-	6.285	3.691	2.344	1.544
2007	8.818	5.379	-	-	6.840	4.068	1.978	1.311
2008	9.316	5.670	-	-	7.596	4.526	1.720	1.144
2009	8.242	5.006	-	-	6.450	3.802	1.792	1.204
2010	11.215	6.805	-	-	9.054	5.371	2.161	1.434
2011	12.624	7.747	-	-	8.879	5.333	3.745	2.414
2012	17.330	9.429	-	-	13.705	7.096	3.625	2.333
2013	17.109	9.088	905	305	14.000	7.351	2.204	1.432
2014	18.866	9.428	2.593	696	14.775	7.739	1.498	993
2015	15.448	9.148	-	-	14.321	8.397	1.127	751

Fuente: Anuario de la Minería 2015. SERNAGEOMIN.

La Tabla 1-1, muestra una baja en la producción de hierro de 2014 a 2015 de un 3%, por lo que se deduce de este hecho, la disminución progresiva de los minerales oxidados en el país.

Los procesos metalúrgicos de extracción de cobre, recuperan cobre desde minerales sulfurados como la calcopirita ($CuFeS_2$), mineral en el que viene incluido el hierro en las

mismas proporciones del cobre, además de venir en las menas acompañado en minerales como la pirita (FeS_2), la que finalmente depositada en relaves, genera drenajes ácidos [2]. Mientras, en Chile existe una decadencia de minerales oxidados, explotándose los minerales sulfurados con mayor prioridad, la magnetita, hematita y siderita, son algunos de los minerales oxidados de hierro que por lo tanto tienden a disminuir con el tiempo para la minería del hierro y siderurgia. Por esta razón, es necesario aplicar la innovación en los procesos de minerales sulfurados, que aporte la recuperación del hierro, del cual el país produce el 0,38% de este mineral a nivel mundial y que no solo abastece a Chile, sino que también exporta una parte al mercado asiático [3].

Para esto, se realiza el presente estudio de factibilidad técnica sobre separación magnética de minerales en procesos de extracción de minerales sulfurados de cobre, el cual intenta probar una alternativa a la recuperación del hierro y además, se pueda optimizar la pureza del cobre en su producción.

A continuación, se lleva a cabo una investigación e implementación de la separación magnética en los procesos productivos de minerales sulfurados de cobre donde más se efectúa la separación del mineral de valor desde las menas; se prueba esta técnica en los procesos de conminución y flotación a escala laboratorio, con el fin de conocer si es factible incluir la separación magnética en los procesos de producción de cobre, para recuperar el hierro y así disminuir progresivamente la presencia de éste en los pasivos mineros.

Objetivo General:

Desarrollar un estudio de factibilidad técnica de la separación de minerales sulfurados, por medio de magnetismo en los procesos de concentrado, para la recuperación de hierro.

Objetivos Específicos:

- Realizar una investigación de fundamentos de Separación Magnética de Hierro, mediante bases teóricas y fuentes bibliográficas.
- Implementar el proceso de separación magnética, previo y posterior a la etapa de flotación, por medio de pruebas con mineral sulfurado mixto.
- Evaluar los resultados de la experiencia, mediante el análisis de la recuperación de Concentrado de Hierro.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE MINERALES

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE MINERALES

1.1.- PRINCIPIOS DEL MAGNETISMO

El magnetismo es una propiedad que poseen todos los cuerpos, pero con distinto grado, respondiendo al campo magnético aplicado con atracción o repulsión. Se puede dar en imanes permanentes o electrizados, dependiendo la potencia que se requiera para imantar.

1.1.1.- MAGNETISMO

El magnetismo es un fenómeno natural en el que los objetos desempeñan fuerzas de atracción o de repulsión sobre otros materiales. Algunos elementos que tienen más propiedades magnéticas que otros son el hierro, cobalto y níquel, y aceros o aleaciones de éstos, las cuales conforman los imanes.

1.1.1.1.- IMÁN

Un imán (Figura 1-1) es un objeto que tiene un magnetismo importante, el cual atrae a otros imanes, o metales ferromagnéticos como el hierro, el níquel, cobalto y aleaciones. Pueden ser naturales o artificiales.

Los imanes naturales son minerales con propiedad magnética como la magnetita, mantienen su campo magnético continuo, sin embargo esto se ve afectado cuando se les aplica calor por sobre la temperatura de Curie.

Un imán artificial es un material ferromagnético, al que se le ha adquirido magnetismo; éstos pueden ser permanentes y temporales. Un imán artificial permanente está fabricado con acero imantado, conservando su propiedad de atracción durante mucho tiempo. Un imán artificial temporal, pierde su magnetismo cuando la causa que lo provoca se ve interrumpida.

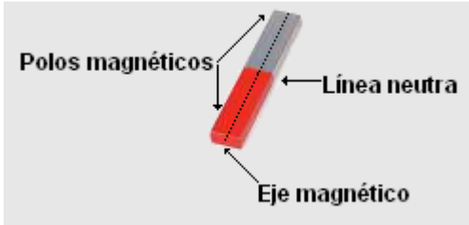

Figura 1-1. Partes de un imán

El imán, como aparece en la Figura 1-1, consta de ejes magnéticos que unen los polos, una línea neutra la cual separa los polos del imán, y los polos magnéticos norte y sur del imán, en los que se encuentra toda la intensidad del magnetismo.

1.1.1.2.- POLOS MAGNÉTICOS

Los polos magnéticos son las zonas del imán donde se produce mayor atracción. Un imán consta de dos extremos donde existe una mayor concentración magnética, la cual va disminuyendo hacia el centro hasta desaparecer. Estos polos, son llamados polo norte y polo sur; los polos diferentes se atraen y los polos iguales se repelen.
Entre ambos polos se generan líneas de fuerza, siendo líneas cerradas que circulan dentro y fuera del imán de un polo a otro, como aparece en la Figura 1-2.
Si el imán se rompe, cada fragmento del imán forma nuevos imanes y cada uno obtiene su polo norte y polo sur, sin embargo, la fuerza de atracción disminuye.

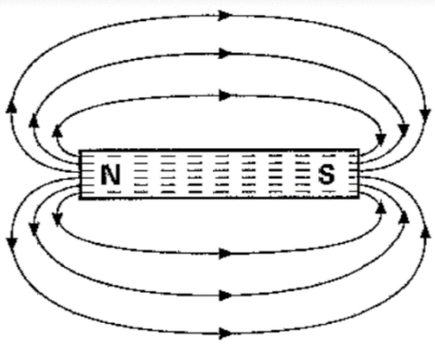

Figura 1-2. Líneas de fuerza de polo sur a polo norte.
Fuente: Libro Electrotecnia.

En la Figura 1-2, se muestran las líneas de fuerza en dirección sur a norte. La regla de Ampére se refiere a este hecho en el electromagnetismo.

1.1.1.3.- CAMPO MAGNÉTICO

Es el espacio próximo al imán, en el que se da el fenómeno magnético. Siendo más intenso en los polos norte y sur. La forma del campo magnético es representada por las líneas de fuerza (Figura 1-2), que circulan de sur a norte, saliendo por el norte y entrando por el sur, y así cíclicamente.

Cuando un material conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor también aparece un campo magnético; dependiendo de la intensidad de la corriente que fluye por el conductor, es la intensidad del campo magnético generado [4].

1.1.2.- ELECTROMAGNETISMO

Para ciertas aplicaciones, los campos magnéticos de los imanes resultan ser débiles, por lo que para conseguir un campo magnético de mayor intensidad se utilizan bobinas con conductores eléctricos.

Hans Cristian Oerstedt, físico, en 1820 descubrió que una corriente eléctrica podía producir un campo magnético; puso una aguja de brújula cerca de un cable por el que circulaba corriente eléctrica, y la aguja comenzó a girar. Esto se debe a que, los electrones en movimiento hacia un mismo sentido (que pasaban por el cable con corriente), crean un campo magnético. Si el cable se enrolla, el campo magnético se concentra, aumentando la fuerza magnética.

El electromagnetismo son fenómenos magnéticos que aparecen cuando los conductores y bobinas son recorridos por una corriente eléctrica, cuya intensidad depende de la intensidad de la corriente y del número de espiras de la bobina [4].

1.1.2.1.- SOLENOIDE

Fue creado por André-Marie Ampére en 1822. Es una bobina de forma cilíndrica que lleva enrollado un cable conductor, por el que pasa corriente eléctrica generando un intenso campo magnético, el cual opera como un imán recto.

Si las espiras (cable conductor enrollado), están muy cercanas al solenoide, la corriente entra por el polo sur y sale por el polo norte, según la regla de Ampére [5].

Si la longitud del solenoide es mayor que su radio, las líneas que salen del extremo del polo norte se extienden ampliamente antes de llegar al polo sur. Por esto, el exterior del solenoide se presenta un campo magnético débil. Aunque al interior del solenoide existe un campo magnético mucho más intenso y constante en todos los puntos.

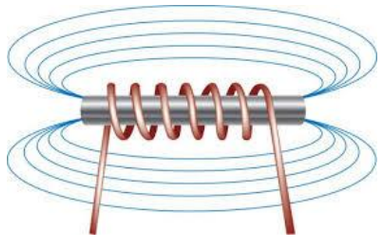

Figura 1-3. Solenoide

En la Figura 1-3, el solenoide transmite las líneas de fuerza generadas por el campo magnético que provoca la corriente en las espiras.

1.1.2.2.- ELECTROIMÁN

Un electroimán es un imán artificial temporal. Consta de un núcleo de hierro, acero u otro material de susceptibilidad magnética, rodeado de una bobina de alambre conductor de electricidad, también llamado solenoide, que se imanta cuando pasa una corriente eléctrica por éste, y se desimanta cuando se interrumpe la corriente. Al fluir los electrones por la bobina, ésta tiene fuerza suficiente para atraer objetos pequeños de hierro o acero; si se inserta un trozo de hierro dulce dentro de la bobina, se concentra aún más el efecto magnético y se forma un electroimán.

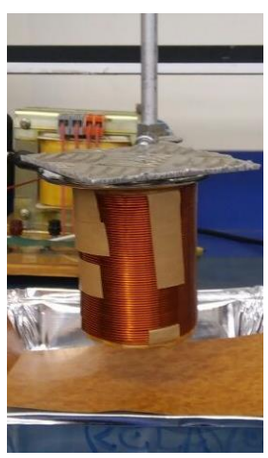

Figura 1-4. Ejemplo de Electroimán

Fuente: Elaboración Propia

El electroimán de la Figura 1-4, tiene un núcleo de acero y espiras de cobre, como principal conductor de electricidad.

1.1.2.3.- CORRIENTE ELÉCTRICA

Es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material. En el SI se expresa en C/s (Coulumb sobre segundo), lo que se denomina Ampére [A]. Al ser un movimiento de cargas, produce un campo magnético, lo que se relaciona estrechamente al electroimán.

Los tipos de corriente más comunes que existen son la corriente alterna y corriente continua. Esta última, un flujo de carga eléctrica que circula siempre en la misma dirección sin cambiar de sentido, a diferencia de la corriente alterna que varía al pasar el tiempo. En un electroimán se necesita de una fuente de energía continua para mantener el campo magnético en su estructura.

1.1.2.4.- HISTÉRESIS MAGNÉTICA

La histéresis significa remanencia. Es un fenómeno que produce pérdidas en los núcleos de los electroimanes cuando se someten a campos magnéticos alternos. Dicha pérdida se transforma en calor el cual reduce el rendimiento del circuito magnético.

Las pérdidas por histéresis en materiales sometidos a campos magnéticos producidos por corrientes alternas, aumentan con la frecuencia, es decir, cuanto más ciclos de histéresis se den por segundo, más calor se producirá. Por esto, la mejor opción para este estudio es la corriente continua.

1.1.3.- MAGNITUDES MAGNÉTICAS

Las magnitudes magnéticas se utilizan para definir los campos electromagnéticos [4].

1.1.3.1.- INDUCCIÓN MAGNÉTICA

Es la concentración de líneas de fuerza que atraviesan la superficie. Se denomina con la letra B.

En el SI su unidad es el Tesla [T] y en el Sistema CGS su unidad es el Gauss [Gs]. La relación entre ambas unidades es 1 T = 10^4 Gs. Así como 1 T = 1 Wb/1 m^2.

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Donde: Φ: Flujo magnético

S: Superficie del imán

1.1.3.2.- FLUJO MAGNÉTICO

El flujo magnético es una medida de la cantidad de magnetismo que circula. Se representa por la letra griega Φ. La unidad de medida del flujo magnético por el SI es el Weber [Wb] y por el Sistema CGS el Maxvelio [Mx]. La relación entre ambas unidades es 1 Wb = 10^8 Mx.

Se calcula con la inducción magnética y la superficie por la que actúa.

$$\Phi = B \times S$$

Donde: B: Inducción magnética

S: Superficie del imán

1.1.3.3.- INTENSIDAD MAGNÉTICA

Indica lo intenso que puede ser el campo magnético. Se representa con la letra H y su unidad es Ampére – vuelta/ metro [Av/m].

Mientras más larga es la bobina, las líneas del campo magnético más se dispersan, resultando una intensidad magnética débil, por lo que ésta es inversamente proporcional a la longitud de la bobina, como se expresa en la ecuación.

$$H = \frac{N \times I}{L}$$

Donde: N: Número de Espiras

I: Intensidad de la corriente en ampére

L: Longitud de la bobina en metros

1.1.3.4.- FUERZA MAGNETOMOTRIZ

Es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza, aumenta con la intensidad de la corriente que fluye por la bobina y con el número de espiras que la rodea. Se representa con la letra $\mathscr{F}$ y su unidad es Ampére – vuelta [Av].

$$\mathscr{F} = N \times I$$

Donde: N: Número de vuelta

I: Intensidad de la corriente en ampére.

1.1.3.5.- FUERZA DE ATRACCIÓN MAGNÉTICA

La fuerza de atracción magnética es la fuerza con la que un electroimán atrae a una pieza de hierro móvil o material ferromagnético a través del aire o entrehierro. Su unidad de medida es el Kilopondio [Kp] en el Sistema Técnico de Unidades, o bien, Newton [N] por el SI. Ambas unidades se relacionan: 1 Kp = 9,81 N.
Se calcula de la siguiente manera [4].

$$F = 40.000 \times B^2 \times S$$

Donde: B: Inducción del núcleo en T

S: Superficie de contacto entre el núcleo y el hierro móvil en m^2

1.1.4.- PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

Es la capacidad de un medio o sustancia de hacer pasar campos magnéticos (líneas de fuerza) a través de sí, como aparece en la Figura 1-5, así como también de poder ser atraído a éstos. Es una característica magnética de la materia; en el vacío es baja y en materiales como el hierro es elevada. Se representa por el símbolo μ y su unidad de medida en el SI es el Henrios/metro [H/m].
La permeabilidad absoluta μ, relaciona la intensidad magnética que produce la bobina H con la inducción magnética B al introducir un material ferromagnético en el núcleo como se aprecia en la ecuación.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

La permeabilidad no es constante, dependiendo fundamentalmente de la inducción a la que se someta el material.

La Permeabilidad del vacío es una constante magnética, aproximadamente igual a la del Aire. Se define por el SI como:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

Entonces la permeabilidad absoluta con la permeabilidad relativa se relacionan de la siguiente manera:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu 0}$$

Donde: μ: Permeabilidad absoluta

μ_0: Permeabilidad del vacío

Todo material magnético tiene su propio coeficiente de permeabilidad. Mientras mayor sea esta permeabilidad, mejores serán las propiedades magnéticas.

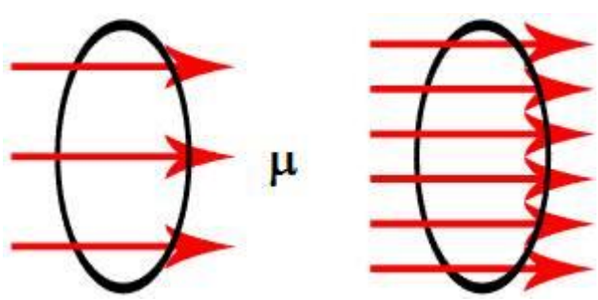

Figura 1-5. Líneas de flujo magnético atravesando un medio susceptible.

A la capacidad del medio de captar y establecer líneas de flujo magnético, como muestra la Figura 1-5, se le llama permeabilidad magnética.

1.2.- PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS MINERALES

Los minerales tienen diferente comportamiento ante un campo magnético, pudiendo atraerse a éste o repelerlo. Según su permeabilidad magnética relativa, los minerales pueden ser:

Paramagnéticos: Son materiales que experimentan magnetización ante la aplicación de un campo magnético, con una permeabilidad relativa ligeramente superior a la unidad.

Ferromagnéticos: Son materiales que experimentan una alta paramagnetización ante un campo magnético. Tienen una permeabilidad relativa muy superior a la unidad.
El hierro es un material ferromagnético

Diamagnéticos: No experimentan magnetización con la aplicación de un campo magnético, debido a que la permeabilidad interna es casi igual a la externa, o sea, al ambiente que rodea al cuerpo. Su permeabilidad es inferior a la unidad.
El azufre y el cobre son materiales diamagnéticos. La mayoría de los materiales diamagnéticos, coinciden en que no tienen un número par de electrones.

Taggart en 1948 clasificó algunos minerales según estos tipos de magnetismo.

Tabla 1-2. Clasificación de minerales según su permeabilidad

TIPO DE MAGNETISMO	MINERAL	PERMEABILIDAD RELATIVA
Ferromagnéticos	Hierro	100
	Magnetita	40,18
	Franklinita	35,38
	Ilmenita	24,7
Paramagnéticos	Pirrotina	6,69
	Siderita	1,82
	Hematites	1,32
	Goethita	0,84
	Pirolusita	0,71
Diamagnéticos	Granates	0,4
	Cuarzo	0,37
	Cerusita	0,3
	Pirita	0,23
	Dolomita	0,22
	Mispiquel	0,15
	Magnesita	0,15
	Calcopirita	0,14
	Yeso	0,12
	Cinabrio	0,1
	Cuprita	0,08
	Smithsonita	0,07
	Ortosa	0,05
	Galena	0,04
	Calcita	0,03

En la tabla 1-2, se puede apreciar que la calcopirita y la pirita según su permeabilidad relativa son materiales diamagnéticos.

1.2.1.- MINERALES ESTUDIADOS

1.2.1.1.- CALCOPIRITA

La calcopirita (Figura 1-6), es la mena de cobre con mayor distribución en el mundo. Se considera diamagnética, sin embargo, presenta magnetismo luego de ser calentada.

Figura 1-6. Mena de Calcopirita

En la Figura 1-6, se muestra una mena de calcopirita, cuya fórmula química es $CuFeS_2$. Tiene una dureza de 3,5 a 4 en la escala de Mohs y una densidad de 4,19 g/cm^3.

1.2.1.2.- PIRITA

La pirita (Figura 1-7) es un mineral sulfurado de hierro, que viene acompañado de la calcopirita. Es considerado como mineral diamagnético, aunque tiene propiedades magnéticas luego de ser calentada.

Figura 1-7. Mena de Pirita

En la Figura 1-7, mena de pirita cuya fórmula química es FeS_2. Tiene una dureza de 6 a 6,5 en la escala de Mohs, con una densidad de 4,95 a 5,10 g/cm^3.

1.2.2.- LEY DE CURIE

La ley de Curie, establece que un material paramagnético al aumentar el campo magnético aplicado, tiende a volverse cada vez más magnético, sin embargo, se vuelven cada vez menos magnéticos al elevarse la temperatura. La temperatura de Curie (T_C) establece temperaturas límite por sobre la cual un material ferromagnético pierde sus propiedades magnéticas y pasa a ser un material paramagnético. Algunas temperaturas de materiales ferromagnéticos se muestran en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Temperaturas de Curie de algunos minerales ferromagnéticos

Mineral	**T_C (°C)**
Cobalto (Co)	1127
Hierro (Fe)	770
Níquel (Ni)	360
Magnetita (Fe_3O_4)	585

En la Tabla 1-3, se muestran las temperaturas por las cuales, un mineral ferromagnético es capaz de perder su propiedad magnética, volviendo su permeabilidad relativa igual a cero, lo que lo convierte en paramagnético. Para el caso de la pirita (mineral diamagnético), su punto de Curie es 320°C, punto sobre el cual, no presenta magnetización.

1.3.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE MINERALES

La separación magnética es un proceso que sirve para separar dos sólidos, de los cuales uno debe ser ferroso o tener propiedades magnéticas.

El proceso consiste en tener un imán puesto sobre la mezcla homogénea, mientras separa el sólido ferromagnético o paramagnético de un diamagnético.

La aplicación de la separación magnética de minerales se ha utilizado en la minería del hierro hace más de 100 años.

Las empresas como Compañía Minera del Pacífico (principal productora de hierro de Chile) y SGS, utilizan este método en sus procesos de concentración del mineral.

La separación magnética se utiliza para la eliminación o separación de fragmentos metálicos que puedan destruir equipos como chancadoras y molinos, y/o para procesos de concentración o purificación magnética.

1.3.1.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE FRAGMENTOS METÁLICOS

Los separadores magnéticos que eliminan fragmentos metálicos, son normalmente aplicados sobre materiales secos o que contengan solamente humedad superficial. Los separadores más comúnmente utilizados para estos efectos, son: tambores o poleas magnéticas, electroimanes suspendidos como se puede ver en la Figura 1-8, placas magnéticas, parrillas magnéticas y detectores de metales.

Figura 1-8. Electroimán industrial suspendido

En la Figura 1-8, se muestra un ejemplo de separación magnética por electroimán.

1.3.2.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA PARA CONCENTRACIÓN Y PURIFICACIÓN

La concentración magnética, es la separación en grandes cantidades de producto magnético, mientras que la purificación magnética se refiere a la eliminación de pequeñas cantidades de partículas magnéticas de material no magnético.

Entre los separadores magnéticos y purificadores se encuentran los separadores del tipo húmedo o por vía húmeda y los separadores del tipo seco o por vía seca.

Las fuerzas magnéticas, de gravedad, de atracción o repulsión, centrífuga e hidrodinámica son fundamentales para la selectividad de la operación a utilizar, además de la intensidad magnética que se aplica.

1.3.2.1.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE BAJA INTENSIDAD

Se utiliza para separar especies ferromagnéticas y paramagnéticas de las diamagnéticas, debido a la alta fuerza de magnetización de las especies magnéticas, es necesaria la aplicación de fuerzas centrífuga e hidrodinámica (además de la fuerza de gravedad), para una mejor selectividad de las partículas; generalmente se realiza a 0,05 T (menor a 0,2 T) en tambores rotatorios por vía húmeda (Figura 1-9).

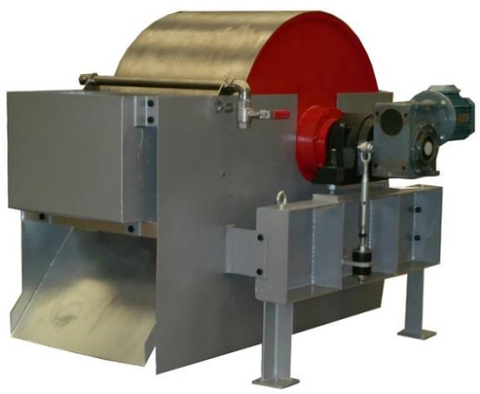

Figura 1-9. Tambor rotatorio para vía húmeda

La Figura 1-9, presenta un tambor rotatorio, en el cual son separadas las partículas magnéticas de las que no lo son.

1.3.2.2.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE ALTA INTENSIDAD

Es utilizado para separar especies paramagnéticas de las diamagnéticas. Al ser débil la fuerza magnética que experimentan las partículas paramagnéticas, se realiza en vía seca a una intensidad de 2T (sobre 0,9 T) y en equipos no rotativos; aunque, si el material presenta un paramagnetismo alto, se puede realizar en medio húmedo.
Existen separadores de alta intensidad por vía húmeda, permite la recuperación de hierro en menas de hierro débilmente magnéticas, incluso en fracciones finas (menores a la malla 200).

Para la separación magnética de minerales, se pueden utilizar imanes permanentes y electroimanes. Una nueva tendencia es utilizar imanes permanentes de tierras raras, como el neodimio, mineral que aumenta la fuerza magnética de los imanes.

1.3.3.- CASOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN MINERALES

A continuación, se dan a conocer algunos casos donde se realizó pruebas eficientes en minerales.

1.3.3.1.- CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA EN RELAVES DE COBRE

La Universidad de Atacama, realizó un proyecto de separación magnética de hierro en relaves el año 2014, en la Planta Manuel Antonio Matta de la Empresa Nacional de Minería, con un tubo Davis como se muestra en la Figura 1-10.

Figura 1-10. Tubo Davis.

Fuente: Centro de Investigación JRI

Éste, consiste en un electroimán que genera la electricidad de campo magnético, un tubo de separación de vidrio y un mecanismo de agitación accionado por motor [6]. El tubo es colocado entre los polos del imán a 750 gauss (0,075 T) en un ángulo de 45°, mientras se mueve hacia adelante y hacia atrás al tiempo que va girando simultáneamente. Todas las partículas no magnéticas se descargan del tubo. A este proceso se le suman otros procesos con tambor magnético, remolienda, agua de mar, etc., que influyó en los prósperos resultados.

De este proceso, se obtuvieron leyes altas de hierro, entre 62,41% y 67,86% de hierro, demostrando así que es posible un mayor aprovechamiento de la masa de los relaves mineros.

1.3.3.2.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA Y ELECTROSTÁTICA

La empresa líder en inspección, verificación, ensayos y certificación, SGS, desde 2012 hasta la fecha, se ha dedicado a realizar pruebas de separación magnética en minerales a

escala de laboratorio y escala piloto. Entre sus capacidades, se encuentra la separación magnética en seco y húmeda, de alta y baja intensidad (con fuerzas de campo de hasta 25 T). Trabajan con separadores de Tubo Davis, de tambor, con imanes de tierras raras, separadores electrostáticos de corrientes parásitas, sirviendo así, sus productos a empresas mineras que extraen minerales oxidados [7].

CAPÍTULO 2. IMPLEMENTACIÓN DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN MINERALES SULFURADOS

CAPÍTULO 2. IMPLEMENTACIÓN DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN MINERALES SULFURADOS

Se trabajó con un mineral mixto que contiene calcopirita y pirita (Figura 2-1), extraído de la Minera Los Pimientos, ubicado en la ciudad de Graneros de la Región Libertador General Bernardo O'Higgins.

Figura 2-1. Mineral mixto con presencia de Calcopirita y Pirita

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

En la Figura 2-1, se presentan 5 kg de mineral mixto con presencia de Calcopirita y Pirita.

2.1.- CONMINUCIÓN DEL MINERAL

Para la disminución de tamaño de la mena, se seleccionó 5 kg de mineral mixto (Figura 2-1), el cual fue machacado con un combo (herramienta), previo a ser llevado a proceso de chancado, teniendo así, un tamaño de roca adecuado para la estructura del equipo triturador. Luego se utilizó el equipo Chancador de muelas LEESON, que se muestra en la Figura 2-2.

Figura 2-2. Chancador de Muelas de Laboratorio

Fuente: Elaboración propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

En la Figura 2-2, se muestra el Chancador de muelas de Laboratorio en el que se realizaron 5 chancados: el primero en apertura máxima (OSS) con 15 mm, el segundo en apertura media (MSS) con 8,75 mm y el tercero de apertura mínima (CSS) con 2,5 mm, finalizando con dos aperturas cero (cuando la muela móvil colisiona con la muela fija), obteniéndose partículas más finas del mineral, como se muestra en la Figura 2-3.

Figura 2-3. Partículas finas de mineral chancado

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en Laboratorio de Metalurgia

La Figura 2-3 presenta el mineral conminuido para ser separado por tamaño en tamices

2.1.1.- SELECCIÓN DE TAMICES

Para efectuar el tamizado, se realizó el método Feret en diferentes tamaños de roca de salida de la trituración, estableciéndose un total de 6 tamices para utilizar, con la norma ASTM, los cuales son presentados en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Serie de Tamices utilizados en la experiencia

N° Tamiz	Medida en µm
12	1700
20	850
40	425
80	180
120	125

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 2-1, se expresan los números de tamices y su respectivo tamaño de orificio de malla, en micrones. Esto de acuerdo al Método Feret, que consiste en el promedio de diferentes tamaños de muestras de partículas de roca seleccionada; este promedio se multiplica por $\sqrt{2}$ y se obtienen los siguientes tamices a utilizar.

La ejecución fue sometida a un Tamizador Retsch, modelo AS200 basic (Figura 2-4), a vibraciones de amplitud 2 del equipo, con un tiempo de 12 minutos por tamizado.

Figura 2-4. Serie de Tamices utilizados

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura 2-4 presenta los tamices que se utilizaron, realizándose 24 tamizados para obtener 950 gramos de material fino bajo la malla del tamiz n° 120 (fondo de la serie de tamices), el cual es el tamaño adecuado de partículas para ser flotado según experimentación en laboratorio.

2.2.- PRIMERA PRUEBA DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Se realizó una prueba de magnetización en el mineral sin alteración química, solo física (conminución), con un imán permanente; se acercó el imán al mineral mixto, sin embargo, no hubo respuesta magnética de este, por lo que se procedió a realizar otra prueba con un electroimán, cuya fuerza magnética supera la de un imán permanente.

2.2.1.- ELABORACIÓN DEL ELECTROIMÁN

Debido a que no se contaba con un electroimán en laboratorio, se llevó a cabo la construcción del electroimán, siguiendo los respectivos cálculos para su fabricación.

2.2.1.1.- DIMENSIONES DEL NÚCLEO

Para el núcleo, se utilizó una barra cilíndrica de acero SAE 1020 con una placa para su sostenimiento (Figura 2-5). A esta barra se le dejó un espacio de 4 mm en cada extremo, para el posterior embobinado con espiras (cable de cobre).

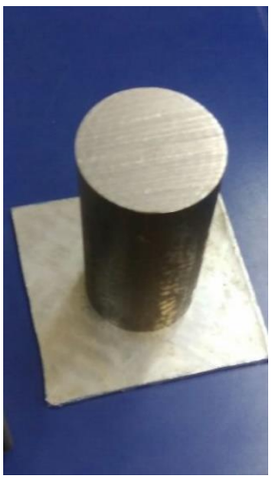

Figura 2-5. Núcleo cilíndrico

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Electricidad

En la Figura 2-5, se muestra el núcleo cilíndrico de acero SAE 1020, de 10 cm de largo por 5 cm de ancho.

Con estos datos, se calculó el área transversal del cilindro por donde circularía la onda electromagnética y la ecuación para conocer la cantidad de espiras que rodearía a este núcleo.

2.2.1.2.- DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE ESPIRAS

Ecuación experimental corriente alterna para conocer el número de espiras:

$$E = 4{,}44 \times f \times B \times A \times N \times 10^{-4}$$

Donde: f = Frecuencia = 50 Hz

A = Área ($A = \frac{\pi}{4}$ x 5^2) = 19,635 cm^2

E = Energía 120 V

B = 1,5 T (inducción experimental del transformador)

Como esta ecuación es para corriente alterna, se debe transformar luego a corriente continua.

El transformador direcciona una fuente de tensión a 120 y 220 V de corriente alterna.

Entonces para 120 V:

$$120\ V = 4{,}44 \times 50 \times 1{,}5 \times 19{,}635 \times N \times 10^{-4}$$

$$N = \frac{120\ V}{4{,}44 x\ 50\ x\ 1{,}5\ x\ 19{,}635\ x\ 0{,}0001}$$

N = 184 espiras

La corriente continua es 1/50 de la corriente alterna, por lo que para corriente continua la energía es 2,4 V.

Para 220 V:

$$N = \frac{220\ V}{4{,}44 x\ 50\ x\ 1{,}5\ x\ 19{,}635\ x\ 0{,}0001}$$

N = 336 espiras

Para corriente continua la energía a utilizar es 4,4 V.

2.2.1.3.- PROPIEDADES MAGNÉTICAS DEL ELECTROIMÁN

Permeabilidad Magnética:

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ $\mu_{r\ hierro \pm C} = 200$ $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \times 200 = 2{,}51 \times 10^{-4}$ [H/m]

Intensidad Magnética (ecuación de permeabilidad):

$$H = \frac{1{,}5\ [T]}{2{,}51\ x\ 0{,}0001\ [H/m]} = 5976{,}1\ [Av/m]$$

Para definir la corriente en ampere a utilizar, se calculó con la ecuación de la intensidad magnética.

Corriente para 184 espiras:

$$5976{,}1\ [\text{Av/m}] = \frac{184\ x\ I}{10\ cm\ x\ 0{,}01} = \frac{184\ x\ I}{0{,}1\ m}$$

$$I = \frac{5976{,}1\ \left[\frac{\text{Av}}{\text{m}}\right] \text{x}\ 0{,}1\ [\text{m}]}{184}$$

$$I = 3{,}25\ [\text{A}]$$

Corriente para 336 espiras:

$$5976{,}1\ [\text{Av/m}] = \frac{336\ x\ I}{10\ cm\ x\ 0{,}01} = \frac{336\ x\ I}{0{,}1\ m}$$

$$I = \frac{5976{,}1\ \left[\frac{\text{Av}}{\text{m}}\right] \text{x}\ 0{,}1\ [\text{m}]}{336}$$

$$I = 1{,}8\ [\text{A}]$$

Con estos datos de corriente que circularía por las espiras, se estableció un cable conductor de cobre, calibre AWG n°16, con diámetro de alambre de 1,3 mm y esmaltado de 1,4 mm, con resistencia de 3,25 hasta 6,55 A/mm^2.

Fuerza Magnetomotriz:

$$\mathscr{F} = 184 \text{ x } 3{,}25\ [\text{A}] = 598\ [\text{Av}] \quad \text{con 184 espiras}$$

$$\mathscr{F} = 336 \text{ X } 1{,}8\ [\text{A}] = 605\ [\text{Av}] \quad \text{con 336 espiras}$$

La fuerza magnetomotriz aumenta si la cantidad de espiras aumenta.

Fuerza de Atracción Magnética:

$$F = 40000 \text{ x } 1{,}5^2\ [\text{T}] \text{ x } 0{,}0019635\ [\text{m}^2]$$

$$F = \frac{176{,}71\ [\text{Kp}]}{9{,}8\ [N]}$$

F = 18 [Kg] que puede levantar este electroimán.

Teniendo estos datos y los materiales, se procedió a la construcción del electroimán.

2.2.1.4.- CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROIMÁN

Para construir el electroimán, se dispuso de un molde de madera cilíndrico de 10 cm de largo por 5,5 cm de ancho, para enrollar las espiras, el cual se efectuó en un contador de vueltas para bobinado (Figura 2-6) del Laboratorio de Electricidad.

Figura 2-6. Contador de vueltas para bobinado
Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Electricidad

En la Figura 2-6, el contador de vueltas para bobinado que enrolló el cable de cobre en el molde de madera cilíndrico, siendo en total 3 capas de 60 vueltas de alambre, conformando 180 espiras para cubrir los 9,2 cm de largo del cilindro, quedando así un espacio de 4 mm en cada extremo del núcleo.

Una vez terminado este proceso, se siguió a separar el embobinado del molde de madera, para ser traspasado al núcleo de acero SAE 1020, conformándose así el electroimán que se muestra en la Figura 2-7.

Figura 2-7. Electroimán

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Electricidad

En el electroimán de la Figura 2-7, quedó un tanto separada la bobina del núcleo, por lo que se le colocó unas cuñas para ajustar la bobina al núcleo. Resultó conformarse con sus dos cables de extremo para conectarlo a corriente en el transformador.

2.3.- SEGUNDA PRUEBA DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Con el electroimán conectado a voltímetro y amperímetro, se realizó una segunda prueba en el mineral conminuido bajo la malla 120. Se pasó el mineral por sobre una mica puesta encima del electroimán, cuya corriente inicial fue de 3,25 [A] y tensión de 2,4 [V], sin embargo, no se imantó ni ocurrió alguna alteración. Luego se aumentó la corriente a 5 [A], no ocurriendo algún fenómeno magnético (Figura 2-8).

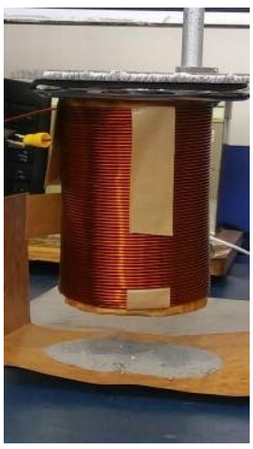

Figura 2-8. Electroimán tratando de imantar la muestra de mineral mixto

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Electricidad

En la Figura 2-8, el mineral mixto no reacciona a las ondas magnéticas del electroimán incluso a 10 [A], momento en que las espiras comenzaron a calentarse, por lo que se detuvo el proceso.

Para comprobar alguna falla del electroimán se realizó una prueba de magnetización en objetos metálicos, imantando perfectamente. Luego se probó con polvo de hierro de 0,2 mm de diámetro, resultando también en una organización de las partículas imantadas, montándose unas sobre otras como muestra la Figura 2-9.

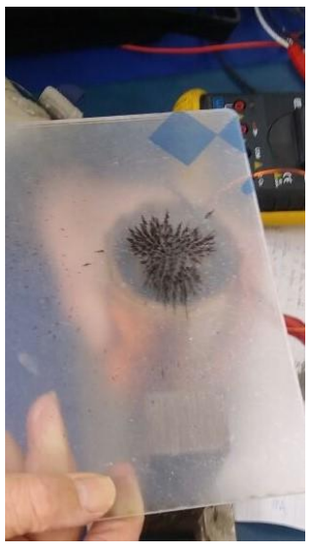

Figura 2-9. Polvo de hierro reaccionando a la atracción magnética del electroimán
Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Electricidad

La Figura 2-9 muestra cómo se ordenaron las partículas de hierro, y a medida que el electroimán se movía, éstas seguían el campo magnético del electroimán.

Ya que el mineral mixto no reaccionó al campo magnético del electroimán, se procedió a separar el cobre del mineral por medio de la flotación.

2.4.- FLOTACIÓN DE COBRE

La ejecución de esta etapa se realizó en una celda de flotación Batch modelo D-12 LAB FLOTACION MACHINE, en la celda 304SST. Para la flotación de minerales se utilizan distintos tipos de reactivos químicos para mejorar la selectividad y estabilidad del proceso.

2.4.1- REACTIVOS DE FLOTACIÓN

En la etapa de Flotación se utilizan reactivos para la mejor selectividad del mineral de valor y así poder separarlo de la ganga. A continuación se presentan los tipos de reactivos que fueron utilizados en el procedimiento.

Colectores: Estos favorecen la condición hidrofóbica de las partículas de sulfuros de los metales que se quiere recuperar, para que se separen del agua y se adhieran a las burbujas de aire. Deben utilizarse seleccionando el mineral de interés para impedir la recuperación de otros minerales.

Los tipos de colectores ocupados en la flotación fueron:

- Aerofloth208: su mayor aplicación se encuentra en la flotación de menas de oro, plata y cobre, además es eficaz para la calcopirita, bornita y covelina.
- Aero 3302 prometer: es selectivo para cobre (Cu), oro (Ag), tiene como principal función es proporcionar propiedades hidrofóbicas a los minerales que se deseen flotar.

Espumante: Tiene como objetivo producir burbujas resistentes, además alteran la tensión superficial de los líquidos, su estructura les permite agruparse hasta formar otra fase distinta del resto del fluido, formando una capa de espuma que separa el mineral del resto de la ganga**.**

El tipo de espumante utilizado en la flotación Batch de la operación fue:

- Oreprep F501, el cual otorga cinética rápida y bajo consumo en circuitos de flotación de sulfuros.

Estos reactivos se muestran en la Figura 2-10.

Figura 2-10. Reactivos de flotación utilizados

En la Figura 2-10, se presentan los reactivos del Laboratorio de Metalurgia que se utilizaron en el proceso de flotación. Las dosificaciones de los reactivos son:

Tabla 2-2. Dosificación en gramos por tonelada del reactivo

Reactivo	Dosificación en g/ton
Aerofloth 208	50
Aero 3302 prometer	25
Oreprep 501	100

Las dosificaciones de la tabla 2-2 son experimentales.

La cantidad de reactivo agregada fue calculada por la siguiente expresión:

$$\frac{((\text{Dato cantidad g/ton}) \text{ x } ((1 \text{ ton})}{(1000\text{k}) \text{ x } ((1\text{kg/ } (1000 \text{ g})) \text{ x } ((1\text{ml/ } (1{,}1175 \text{ g})) \text{ x masa del mineral g}} = \text{mL}$$

$$\text{mL x } 1000 = \mu\text{L}$$

De los cuales resultaron las siguientes cantidades.

Tabla 2-3. Dosificación de reactivo calculado para la primera flotación

Reactivo	Cantidad µL
Aerofloth 208	25,95
Aero 3302 prometer	12,97
Oreprep 501	51,9

En la tabla 2-3 se muestran las cantidades de reactivo utilizados en la primera flotación, para la segunda flotación las cantidades de reactivos fueron:

Tabla 2-4. Dosificación de reactivo calculado para la segunda flotación

Reactivo	Cantidad µL
Aerofloth 208	11,30
Aero 3302 prometer	5,65
Oreprep 501	22,6

La tabla 2-4 muestra las siguientes cantidades de reactivo que se usaron para la flotación de cobre desde relave.

2.4.2.- COMPOSICIÓN DE PULPA

Para dicho parámetro, se calculó la composición de la pulpa con un porcentaje de sólido de 40%, por medio de la siguiente expresión:

$$\rho \text{ pulpa} = \frac{100}{\frac{\%\,\text{sólido}}{\rho\,\text{mineral}} + \frac{100-\%\,\text{sólido}}{\rho\,\text{agua}}} \times 1000$$

Donde:

- ρ del agua destilada es 1 g/cm^3
- ρ del mineral es el promedio de densidades de la calcopirita y pirita, 4,5 g/cm^3

Obteniéndose una densidad de pulpa de 1450 g/cm^3, ligando una composición de 580 gramos de mineral (40%) y 870 mL de agua destilada (60%), para la primera flotación.

Para la segunda flotación, se obtuvo una densidad de pulpa de 1150 g/cm^3 con la composición de 200 gramos de mineral (17%) y 950 mL de agua destilada (83%), esta composición se asignó debido a la cantidad material derivado de la primera flotación.

2.4.3.- PRODEDIMIENTO DE FLOTACIÓN

La finalidad del proceso de flotación es la separación los sulfuros de cobre de la composición de la roca original.

En la primera flotación, se utilizó la celda de 1000 mL del equipo, los parámetros de control fueron los siguientes:

El acondicionamiento de agitación de mineral con agua (580 g de material conminuido y 870 mL de agua destilada) fue realizado durante 4 minutos cronológicos (el tiempo fue medido por un cronómetro), a una velocidad de 900 rpm del equipo de flotación. Esto se realiza para que se forme una mezcla homogénea del material con agua, además esta preparación se efectúa sin la suministración de aire, como se muestra en la Figura 2-11.

Figura 2-11. Acondicionamiento del mineral

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

En la Figura 2-11, se muestra el acondicionamiento del mineral sin la inyección de aire; como se ve, no se forman muchas burbujas.

El siguiente paso fue agregar las dosificaciones de los colectores (Figura 2-12), de los cuales el primero fue el colector Aerofloth 208 que se mantuvo en agitación en la celda durante 3 min.; seguidamente se agregó el colector Aero 3302 Prometer en agitación durante 4 min., resultando un total de 7 minutos cronológicos. Al igualmente a una velocidad de 900 rpm del equipo.

Figura 2-12. Incorporacion de reactivos por medio de una micropipeta

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

Posteriormente fue agregado el espumante, el cual estuvo durante 1 min. de agitación. Al pasar el minuto se procedió a incrementar la velocidad a 1300 rpm para la conformación de las burbujas, también se inyectó el paso de aire, proveniente de la bomba en un transcurso de 8 min. de agitación. Estos parámetros se vieron reflejados en el comportamiento de la pulpa, la cual presentó una capa de burbujas que fueron rebalsadas de la celda y colocadas en una bandeja de aluminio, como se muestra en la Figura 2-13. Cuando ya no rebalsaban las burbujas y aún así se generaban, se retiraron manualmente con una espátula la capa espumosa cuidadosamente para no arrastrar material de relave al concentrado. Finalmente en esta flotacion se obtuvo un concentrado, determinado como "C_1" y un relave "R", las cuales fueron secadas a 105ºC en la estufa durante un día.

Figura 2-13. Arrastre de la capa espumosa

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

En la Figura 2-13, se aprecia la gran cantidad de burbujas que se generaron en la primera flotación.

La segunda flotación se ejecutó con el relave "R", esta decisión fue tomada con la consigna de recuperar concentraciones de cobre que probablemte pudieron haber quedado en la pulpa de relave. Los precedimientos de esta flotación fueron similares a la primera situación, no obstante los párametros fueron totalmente distintos, debido a que era menor la cantidad del material a flotar, y al ser un proceso continuo las proporciones se subdividen ajustándose al tratamiento de flotación.

El acondicionamiento de agitación (200 g de mineral proveniente del Relave y 950 mL de agua destilada) fue constituido por 4 min de oscilación en la celda a una velocidad de

1000 rpm. Además evidentemente al ser menor la cantidad de material, se observó bajo nivel volumétrico de la celda como se muestra en la Figura 2-14.

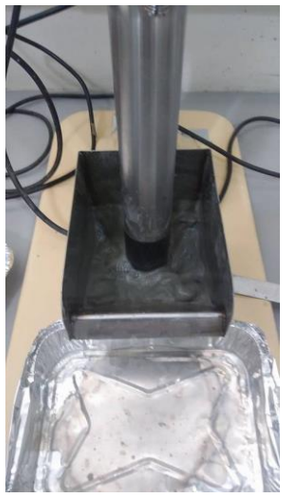

Figura 2-14. Acondicionaminto de la segunda flotación

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La segunda flotación, como se muestra en la Figura 2-14, tiene menor material, tanto de agua como de mineral, por lo que las burbujas tuvieron que ser empujadas a la bandeja con la espátula.

Luego se procedió al agregar los colectores en mismo orden de la experiencia anterior durante 6 minutos de agitación a 1000 rpm. Posteriormente se agregó el espumante Oreprep F501 por 1 minuto de agitación y además se le inyectó el paso de aire, comenzando a formarse la capa espumosa, incrementándole la velocidad de agitación al equipo a 1200 rpm para la conformación de las burbujas durante 6 minutos. Progresivamente las burbujas fueron abandonando la celda como se muestra en la Figura 2-15.

Figura 2-15. Rebalse progresivo de la segunda flotación

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

Como se ve en la Figura 2-15, el comportamiento de las burbujas no era la misma a la de la primera experiencia. Se demostraba menor burbujeo y de menor tamaño, además de ser menos densa, la pulpa poseía un tono más claro con respecto a la flotación anterior, como se muestra en la Figura 2-16. También se acudió al paleteo superficial de la capa espumosa precavidamente para no arrastrar el relave al concentrado.

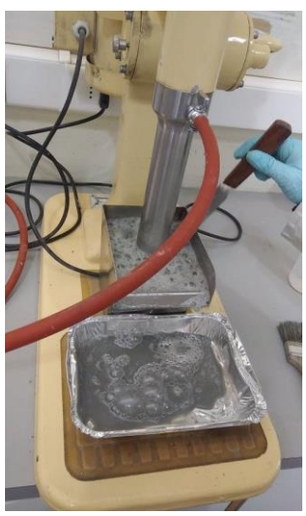

Figura 2-16. Palestro de espuma en la segunda flotación

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

En la Figura 2-16, finalmente se obtuvo un nuevo concentrado, el cual fue llamado “C_2” y el relave final de la flotación “R”. Éstas fueron secadas durante un día a una temperatura de 105ºC en la estufa del laboratorio.

2.5.- TERCERA PRUEBA DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Una vez secado el relave, se procedió a llevarlo al electroimán con las mismas corrientes y voltajes de la vez anterior, y a temperatura ambiente; resultando sin reacción magnética ni alteración.

Entonces, se determinó pasar la muestra por un proceso de calor para probar la imantación por dilatación de las partículas en la estufa del Laboratorio de Metalurgia a 183°C, 124°C y 200°C, dando como resultado los siguientes acontecimientos de la Tabla 2-5:

Tabla 2-5. Sucesos ocurridos en la imantación del electroimán

Temperatura (ºC)	**Acontecimiento**
183	El electroimán no levantó las partículas, no obstante las partículas magnéticas se movieron levemente.
124	No imantó y no se movieron las partículas magnéticas.
200	Imantó al acercar la bandeja de aluminio a 1 mm de distancia del electroimán, a mayor distancia las partículas se movieron levemente.

Como se muestra en la Tabla 2-5, el calor pudo ayudar en la reacción magnética de las partículas de hierro.

Cada muestra fue colocada en distintas bandejas de aluminio para que se disipara la disminución de la temperatura por el medio ambiente como muestra la Figura 2-17.

Figura 2-17. Relave contenido en la bandeja de aluminio

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura 2-18, corresponde a la aplicación del electroimán a una corriente de 10 A, a esta intensidad el solenoide incrementaba su temperatura, lo que fue recomendable no seguir aumentándole la corriente, ya que podría averiar las espiras.

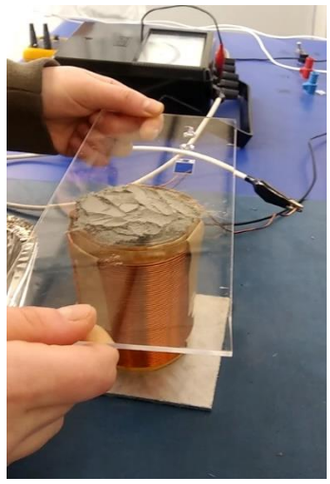

Figura 2-18. Leve movimiento del mineral en el electroimán
Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura, 2-18 muestra la poca reacción magnética que se obtuvo.

Dado los resultados en seco, se procedió a realizar la separación magnética en vía líquida por medio de un agitador magnético modelo F2500010 (230V – 50+60Hz).

2.6.- CUARTA PRUEBA DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

En este operativo el procedimiento fue agregar 300 mL de agua destilada para 100 mL de cada muestra en un vaso precipitado de 500 mL, esto para alcanzar una mezcla homogénea por medio del imán agitador del equipo (Figura 2-19). Esto se realizó con todas las muestras extraídas de la flotación.

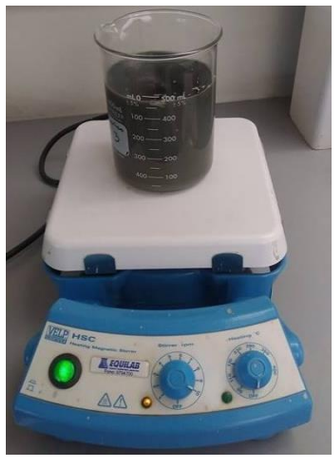

Figura 2-19. Mezcla homogénea en agitador magnético

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura 2-19, representa el procedimiento que se realizó para separación magnética por medio húmedo. Esto se realizó en dos agitadores magnéticos, uno a temperatura ambiente, y el otro a 150°C.

En las muestras C_1, C_2 y el Relave se les asignó los parámetros de tiempo de agitación de la Tabla 2-6, además la separación de partículas magnéticas, previamente pesadas en la balanza se obtuvo:

Tabla 2-6. Partículas magnéticas obtenidas en las muestras

Muestra	Tiempo de agitación (min)	Partículas magnéticas (g)
C1	12	0,3
C2	12	0,5
Relave	20	1,4

La Tabla 2-6, expresa los resultados de la agitación magnética en cada muestra, demostrándose una extracción de partículas magnéticas (hierro), que se adhirieron a la pila de imán permanente que agitaba la mezcla.

Una vez pasado el tiempo de agitación se procedió a retirar el imán agitador en donde se adherían las partículas magnéticas, las cuales fueron retiradas manualmente con una espátula (Figura 2-20) y agua.

Figura 2-20. Material ferroso recuperado de una muestra
Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura 2-20, corresponde al material ferroso obtenido durante el transcurso de la agitación.

Se determinó más tiempo al relave, ya que suponía mayor contenido de material ferroso. Finalmente se adquirió un total de 2,2 g de material magnético llamado “concentrado de hierro”.

2.7.- DIGESTIÓN ÁCIDA (DA)

Teniendo las muestras C_1, C_2, Relave y Concentrado de hierro se procedió a realizar el método de digestión ácida, el cual tiene como objetivo la solución completa de los analítos y la descomposición total de la muestra evitando la pérdida o la contaminación de la sustancia de interés (determinación de cobre y hierro) para ser analizados en forma de metal puro.

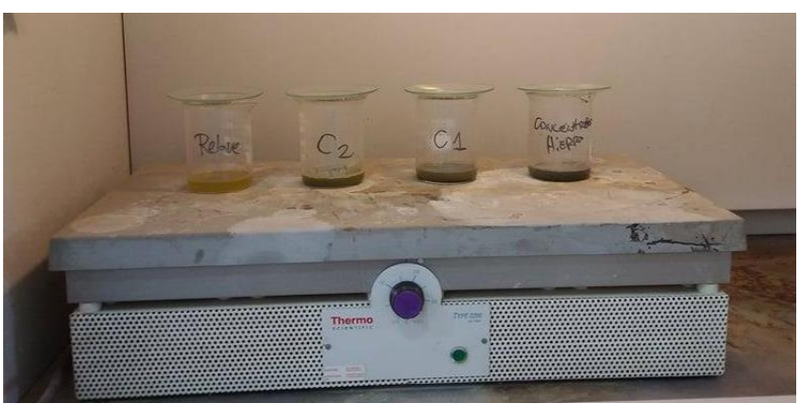

Figura 2-21. Digestión ácida de las 4 muestras
Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura 2-21, se muestra la digestión ácida de las 4 muestras realizadas en el Laboratorio de Metalurgia. Los resultados de la digestión ácida fueron llevados a la Facultad de Ingeniera Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso para realizar el análisis de absorción atómica de cobre y hierro de las 4 muestras de DA (8 análisis en total). Este proceso analiza los elementos metálicos por medio de ondas de luz que absorben fotones de los átomos de los elementos.

Los resultados de este proceso se presentan a continuación en el Capítulo 3.

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

3.1.- RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO

De las muestras obtenidas en los procedimientos realizados, se obtuvieron los siguientes resultados provenientes de la absorción atómica de muestras de cobre y hierro realizadas en la Facultad de Ingeniería Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, que se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Informe del análisis de hierro y cobre

Muestra	mg/L Cu	mg/L Fe
C_1	27,1	532
C_2	37,5	914
R	4,83	520
[ ] Fe	42,4	866

En la Tabla 3-1, se puede notar la presencia de cobre y hierro en todas las muestras, incluso en el concentrado de hierro hay presencia de cobre.

3.1.1.- LEY DE COBRE Y HIERRO EN LAS MUESTRAS

La ley de cobre es el porcentaje de concentración de cobre que hay en una determinada muestra, según Codelco. Este valor es fundamental en la minería, ya que condiciona si son rentables las operaciones de extracción del mineral.

Con los resultados de la absorción atómica, se procede a calcular la ley obtenida de cobre y hierro, en cada muestra con la siguiente expresión:

$$\text{Ley \%} = \frac{\dfrac{\text{Concentración AA} \quad \text{x} \quad \text{Aforo}}{1000}}{\text{Peso de la muestra}} \text{ x Factor dilución}$$

Donde:

- La contracción AA es el valor de la muestra de cobre en mg/L.

- El aforo corresponde al volumen en la cual fue aforado la solución en L (0,25 L).
- Factor de dilución es de 100.
- Peso de la muestra es de 2,5 g en el caso de C_1, C_2 y R, en Concentrado de Fe es 2,2 g.

3.1.1.1.- LEY DE COBRE

De la expresión anterior se calcularon las leyes para cobre, que luego se expresan en la Tabla 3-2.

Concentrado 1:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{27{,}1\left[\frac{mg}{L}\right] \quad x \;\; 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}5\,[g]} \text{ x } 100\%$$

Ley % = 0,271 %

Concentrado 2:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{37{,}5\left[\frac{mg}{L}\right] \quad x \;\; 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}5\,[g]} \text{ x } 100\%$$

Ley % = 0,375 %

Relave:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{4{,}83\left[\frac{mg}{L}\right] \quad x \;\; 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}5\,[g]} \text{ x } 100\%$$

Ley % = 0,0483 %

Concentrado de Hierro:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{42{,}4\left[\frac{mg}{L}\right] \quad x \;\; 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}2\,[g]} \text{ x } 100\%$$

Ley % = 0,482 %

A continuación se presentan los resultados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Ley de cobre de las muestras

Muestra	Ley_{Cu} %
C_1	0,271
C_2	0,375
R	0,0483
[ ] Fe	0,482

La Tabla 3-2, comprende la ley de cobre en las muestras, observándose más presencia en el Concentrado 2, que en el Concentrado 1. El Relave, contenía una menor presencia de cobre, ya que fue intervenido en la segunda flotación. Finalmente el Concentrado de Hierro es el que tiene mayor concentración de cobre.

3.1.1.2.- LEY DE HIERRO

Para obtener estas concentraciones se utilizó igualmente la expresión anterior calculando las muestras a continuación.

Concentrado 1:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{532\left[\frac{mg}{L}\right] \ \text{x} \ 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}5\,[g]} \ \text{x } 100\%$$

Ley % = 5,32 %

Concentrado 2:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{914\left[\frac{mg}{L}\right] \ \text{x} \ 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}5\,[g]} \ \text{x } 100\%$$

Ley % = 9,14 %

Relave:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{520\left[\frac{mg}{L}\right] \ \text{x} \ 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}5\,[g]} \ \text{x } 100\%$$

Ley % = 5,2 %

Concentrado de Hierro:

$$\text{Ley \%} = \frac{\frac{866\left[\frac{mg}{L}\right] \quad x \ 0{,}25[L]}{1000}}{2{,}2\ [g]} \ x\ 100\%$$

Ley % = 9,8 %

Se expresan los resultados calculados de la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Ley de hierro de las muestras

Muestra	Ley_{Fe} %
C_1	5,32
C_2	9,14
R	5,2
[ ] Fe	9,8

De las leyes obtenidas en la Tabla 3-3 se puede notar una gran presencia de hierro en todas las muestras, resaltando más la ley del Concentrado 2.
Estos resultados serán analizados detalladamente a continuación.

3.1.2.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.2.1.- ANÁLISIS DE CONCENTRADO DE COBRE

Con respecto a los resultados entregados, se observa que el Concentrado 2 (C_2) se encuentra con mayor concentración de cobre con 0,375 %, que el Concentrado 1 (C_1) con 0,271% de cobre. Esto debido a que la primera flotación no fue suficientemente eficaz en separar las partículas de cobre de la ganga, o posiblemente faltó paletear aún más la capa espumosa que se formaba en la superficie de la pulpa. No se realizó otra flotación en el Concentrado, por esto no existe una mayor concentración de cobre en los concentrados 1 y 2, destacando la relevancia de realizar más etapas de flotación para conseguir mayor concentración de cobre, dada las bajas leyes que se encontraron en el mineral mixto. La segunda flotación se realizó en Relave, por lo que la posibilidad de extraer concentraciones de cobre, se acercaba a la primera flotación.

El resultado del Relave, era esperado en cuanto a la concentración de cobre, puesto que en éste se realizó la segunda flotación, extrayendo la mayor cantidad de cobre desde el relave en la segunda flotación; por lo tanto el análisis químico del relave, resultó con el más bajo contenido de cobre con una ley de 0,0483%, a lo que se alude una buena separación.

Al respecto, el contenido de cobre en la muestra "Concentración de Hierro"; obtuvo mayor concentración de cobre de todas las muestras conteniendo 0,482% de cobre, por ser el conjunto de todas las concentraciones ferrosas de las muestras (C_1, C_2 y R), que al ser tratadas en agitación magnética, se arrastró partículas de cobre, demostrando esta separación magnética, no ser tan selectiva.

3.1.2.2.- ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO

Las concentraciones de hierro presentaron un comportamiento similar a las concentraciones del cobre, puesto que nuevamente el Concentrado 2 con 9,14% de hierro, representaba ser mayor al del primero que contiene 5,32% de hierro, incluso mayor a las demás muestras; esto se debe a que en la primera flotación, no se realizó una buena ejecución, en lo que respecta a paleteo de las burbujas e inyecciones de aire y agitación, además de no incluir más etapas de flotación, lo cual influyó en los resultados y arrastre de hierro, ya que existía mayor concentración de hierro en el mineral mixto.

En tanto al relave como se esperaba, presentaba mayor cantidad de hierro que de cobre con un 5,2% de hierro en la muestra. Sin embargo, en comparación con las otras muestras, contiene poca concentración de hierro, lo que se puede explicar con los errores en el proceso de flotación y en la falta de flotación de los concentrados, además de la extracción por separación magnética vía húmeda.

Por otro lado, la separación magnética por vía líquida fue exitosa ya que pudo extraer en el Concentrado de Hierro, la mayor cantidad de material ferroso (9,8% de hierro), en la solución de cada muestra por agitación magnética en comparación con los resultados de las otras muestras. Sin embargo, no logró extraer grandes cantidades de hierro, por lo que se requiere de mayor tiempo de agitación y un imán más grande.

3.2.- EVALUACIÓN DE RESULTADOS CON SEPARACIÓN MAGNÉTICA

En la experiencia realizada, sucedieron hechos que no se esperaban, pero que, sin embargo, aportaron otra perspectiva al proyecto de factibilidad del proceso de Separación Magnética de Minerales, los cuales se presentan a continuación.

3.2.1.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA CON ELECTROIMÁN

El enfoque de la investigación fue respecto a una separación magnética por vía seca, y para esto se elaboró un electroimán de una fuerza de 176,71 Kp, para levantar 18 kg. Sin embargo, no pudo levantar las pequeñas partículas de hierro que se encontraban en el mineral (Figura 3-1).

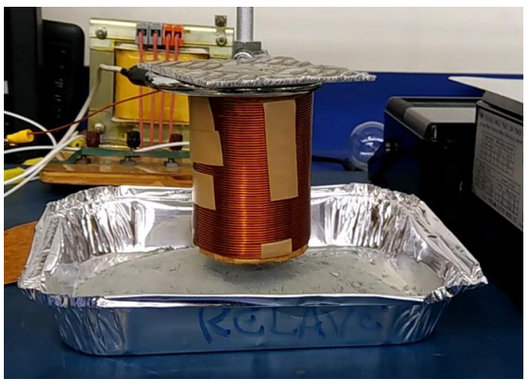

Figura 3-1. Electroimán tratando de levantar partículas de hierro
Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Electricidad

En la Figura 3-1, se muestra la nula respuesta del mineral con granulometría de 125 µm (ver Tabla 2-1) al campo magnético del electroimán. Esto se debe a que la calcopirita y pirita, son minerales diamagnéticos y las partículas de hierro son muy pequeñas, y los electroimanes en suspensión separan fragmentos metálicos.

Al exponer las muestras de mineral a calor de altas temperaturas, dejando el mineral en 185°C y 200°C, se obtuvo una reacción magnética expresada en movimiento del mineral a 1 cm de distancia, sin embargo, no se pudo extraer las partículas de hierro.

De esto, se desprenden dos hipótesis: la primera es que el mineral contenía partículas muy finas de hierro y reducidas en cantidad, y la segunda es que existe una relación con la

cantidad de azufre u otros minerales diamagnéticos en mayor proporción que no deja liberar el hierro. Sin embargo, al agregar calor al mineral en temperaturas sobre los 180°C, se logró obtener una atracción magnética o permeabilidad magnética.

La segunda hipótesis, se justifica en que el azufre tiene su punto de fusión en 116,21°C, por lo que al intervenir la muestra sobre esa temperatura, ocurre el cambio de estado del azufre de sólido a líquido, por lo que las partículas hierro pueden encontrarse más liberadas y fluir con mayor facilidad, siempre que no se llegue al punto de Curie, donde el mineral deje de imantar o tener alguna reacción magnética, que es a los 320°C.

3.2.2.- SEPARACIÓN MAGNÉTICA CON AGITADOR MAGNÉTICO

Cuando se probó con el mineral en proceso de agitación magnética, las partículas ferrosas fueron atraídas hacia el imán del equipo desde el primer momento, como aparece en la Figura 3-2. Esto con el principio de que el agua posee débiles fuerzas intermoleculares que existen en la fase líquida (estado de la materia líquida), por ello las moléculas se separan con facilidad y el material fluye, permitiendo la disociación física de las partículas en el medio. Pero no se pudo obtener mayor concentración de hierro, por ser el imán muy pequeño y ser la solución un tanto espesa, así como también el tiempo que se le dejó a la agitación, no fue suficiente.

Figura 3-2. Imán de agitación magnética imantando hierro

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura 3-2, muestra la eficaz reacción magnética de las partículas de hierro al imán permanente del agitador magnético, adhiriéndose al instante a éste en sus polos, por medio acuoso.

3.2.3.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Existen diversos factores o parámetros que al modificarlos evidentemente mostraron un cambio en el comportamiento de la separación magnética, como lo es la temperatura de la solución o de la muestra, también la dilatación de las partículas. Así como también otros factores que tienen gran incidencia en las ejecuciones realizadas, como lo es el tamaño de las partículas y la fuerza centrífuga en el caso del agitador magnético. Parámetros que son tratados a continuación.

3.2.3.1.- TEMPERATURA DE LAS MUESTRAS

La temperatura fue un factor trascendental tanto para la vía seca como para la vía líquida, puesto que para el primer caso al no haber ningún cambio en la imantación del electroimán a temperatura ambiente, se procedió a calentar en tres instancias las muestra dentro de un bandeja de aluminio para que concentrara el calor, por medio de la estufa del laboratorio, en donde se determinó un rango de temperatura mayor a 180ºC que al ser aplicado el electroimán se vieron las partículas ferrosas desplazarse levemente en la capa de material.

En la vía líquida también se aplicó aumento de temperatura al contar con dos equipos de agitación magnética, se realizó la comparación de uno a temperatura ambiente y el otro con temperaturas a 150ºC mientras permanecían en constante agitación. Al paso del tiempo de agitación, se notó que el imán de la agitación calentada recuperaba mayor proporción de las partículas ferrosas, como se muestra en la Figura 3-3.

Figura 3-3. Imantación de hierro en la solución con temperatura

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

La Figura 3-3, muestra una presencia importante de hierro en el imán, al aplicar calor a la placa del agitador magnético.

El incremento de la temperatura en las muestras diamagnéticas, influye en la adhesión magnética de las partículas ferromagnéticas al imán, depuesto que el calor reaccionó químicamente con sustancias de la muestra dilatando los enlaces de las partículas del mineral, facilitando la separación de éstas. Esto se fundamenta, como se expuso anteriormente, por el punto de fusión del Azufre, el cual se encuentra por debajo de las temperaturas utilizadas, 116,21°C. Estas reacciones o dilataciones no afectan las propiedades ferromagnéticas del mineral ferroso, ya que no se llegó a temperaturas extremas al punto de Curie para perder propiedades magnéticas. Por lo que, se puede obtener mejor resultado de separación magnética con la aplicación de calor en los minerales sulfurados, entre el punto de fusión del azufre y el punto de Curie del mineral a tratar.

3.2.2.3.- TAMAÑO DE PARTÍCULAS

El tamaño de partículas del mineral es fundamental, ya que al ser ejecutado todas estas pruebas a 125 micrones (como se muestra en la Figura 3-4), permite una distribución de agitación uniforme en la vía líquida, de lo contrario ocurren obstrucciones o paralización completa del agitador magnético, esto ocurre también con la cantidad de mineral que se trabaja. En cambio por vía seca, se pudo encontrar una posible imantación al electroimán, si el material fuera más fragmentado y no tan fino, es decir partículas mayores que 125 micrones, y con mayor presencia de hierro.

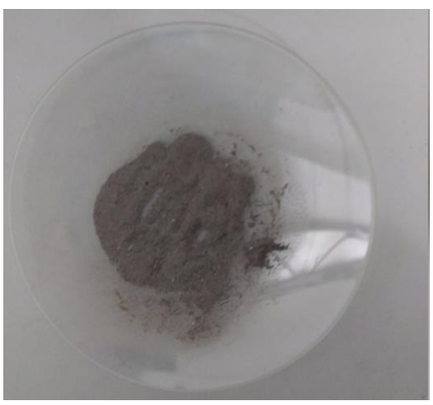

Figura 3-4. Muestra del material en 125 micrones

Fuente: Elaboración Propia. Imagen tomada en el Laboratorio de Metalurgia

En la Figura 3-4, se expone la muestra de mineral de 125 micrones de tamaño que se trabajó para separación magnética en vía seca con imán permanente y electroimán, y posteriormente en vía húmeda con agitador magnético.

3.2.2.4.- FUERZA CENTRÍFUGA

Las fuerzas circulares originadas por la operación del imán del agitador magnético fueron fundamentales en la separación de la vía líquida, puesto que cuando el mineral seco se agregó al agua, las partículas fueron separadas rápidamente del centro hacia las paredes del vaso precipitado, de la forma como se representa en la Figura 3-5. Además debido al remolino central generado por las corrientes del campo magnético del imán, ocasionó que las partículas del medio fueran disparadas al contorno del interior del recipiente. Además esta fuerza generó el desplazamiento del fluido de forma continua, en donde las partículas ferrosas de la mezcla fueron atraídas por los polos del imán.

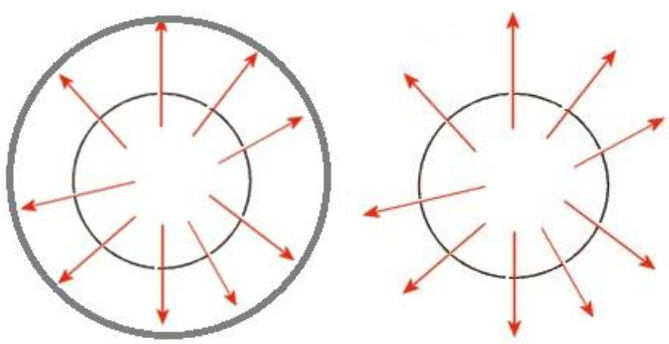

Figura 3-5. Líneas de fuerza centrífuga en el agitador

En la Figura 3-5, se presentan las líneas de fuerza centrífuga del agitador magnetizo, las cuales interpretan las matriculas ferrosas distribuidas en la paredes del vaso precipitado.

Es relevante en la separación magnética, ya que al ser aplicada por medio del agitador magnético, las partículas se desplazan a la misma dirección del campo magnético, ya que el movimiento de agitación circular le proporciona una distribución constante.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Las bases teóricas y bibliográficas, en la investigación realizada sobre la separación magnética de hierro fueron cabales y sólidas, sirviendo como guía al momento de la implementación en la parte experimental del trabajo de título, y a la vez aportando a la elaboración del electroimán, que no existía en el laboratorio.

Las pruebas efectuadas por el electroimán no manifestaron una imantación uniforme y efectiva con el material en cuanto a un medio seco, por lo que se concluye, con respecto a esta actividad, la relevancia del tamaño del mineral, ya que el electroimán funciona mejor para material fragmentado que para partículas finas, al tener material más grueso y aumentándole el calor, podría favorecer la magnetización. Así como también aumentado el número de espiras al electroimán, incrementa la fuerza magnetizadora. Sin embargo, si la prueba se hubiera realizado en electroimanes con Tubo Davis, la respuesta hubiese sido más generosa.

Por otro lado, fue evidente la positiva extracción de hierro en agitador magnético, el cual arrojó en el Concentrado de Hierro la ley más alta de este mineral a recuperar (9,8% de hierro) comparado con los otros resultados, aunque no se logró separar el 100% del material ferroso de la solución, tal como se indicaron en los resultados del análisis atómico.

Se observaron mejores resultados al aumentar la temperatura de las muestras sobre el punto de fusión del azufre (116,21°C), tanto en medio seco con electroimán como en medio húmedo con agitador magnético, debido a que este mineral se encuentra en mayor cantidad en las menas sulfuradas y al ser diamagnético, impide la reacción magnética de las concentraciones metálicas que se puedan hallar en el mineral mixto sulfurado. Por esta razón es necesaria la intervención en el azufre con calor superando su punto de fusión, para obtener mejores resultados en la magnetización y recuperación de las especies metálicas del mineral mixto sulfurado.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que la imantación del mineral sulfurado se debe a los factores involucrados, como lo son las fuerzas intermoleculares, la velocidad centrífuga, temperatura y tamaño de partículas, en un ambiente líquido, que le permite una mayor migración de partículas ferrosas hacia el componente magnetizado y la separación natural del hierro, se concluye con la finalidad del proyecto, realizando un estudio factible

técnicamente de la participación de la separación magnética en los procesos metalúrgicos de minerales sulfurados, produciendo favorablemente en la selectividad del cobre.

RECOMENDACIONES

La exitosa imantación de la vía líquida por medio de la agitación magnética, indica que este proceso es eficaz para lograr una recuperación del hierro, con los parámetros de la disminución del tamaño y el incremento de la temperatura, así como de la fuerza centrífuga, ya que éstas condicionan una mayor distribución en la agitación de la solución para una mejor adhesión magnética de las partículas ferrosas.

Como recomendación de este trabajo de título realizado, nace la idea de implementar una celda de flotación magnética a los circuitos de flotación de minerales sulfurados por medio de un sistema de mecanización, definiendo un imán artificial temporal como un electroimán dispuesto en las paredes de la celda, semejante a un tubo Davis, para introducir y modificar las inducciones magnéticas y así determinar la intensidad de corriente adecuada para medio húmedo, ya que un electroimán es más potente que un imán permanente. O bien, un imán permanente en las paredes de las celdas de flotación, de aleación con minerales de tierras raras como el neodimio, que le da mayor fuerza de atracción magnética. Esto, para separar las partículas ferrosas de las partículas diamagnéticas aprovechando el medio acuoso del proceso de flotación y la fuerza centrífuga que actúa en la celda al momento de girar las aspas, las cuales agitan el agua para formar las burbujas; junto con los reactivos que se utilizan en flotación, podría existir una mejor selectividad y recuperación de hierro, y no afectar a la producción de cobre.

Otra recomendación de este proyecto, es realizar más etapas de flotación en el proceso, para que se marque una mayor diferencia entre la presencia de cobre y hierro en el concentrado. Así como también, un imán de mayor tamaño, para abarcar más concentrado de hierro.

Con estas recomendaciones, este trabajo de título queda abierto para la continuación y elaboración de la celda de flotación magnética, y así probar una mayor recuperación de hierro y hacer este proyecto factible tanto técnica como económicamente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] SERNAGEOMIN, Anuario de la Minería 2015. Extraído: abril de 2017. En línea: http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/anuario/Anuario-de-la-Mineria2015.pdf

[2] SERNAGEOMIN, Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. 2015. http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/GuiaMetodologicaQuimica.pdf

[3] MINERÍA CHILENA. Reportaje. El nuevo impulso del hierro en Chile. Extraído: 1 de mayo de 2017. En línea: http://www.mch.cl/reportajes/el-nuevo-impulso-del-hierro-en-chile/

[4] ALCALDE SAN MIGUEL, Pablo. Magnetismo y Electromagnetismo. En su: Electrotecnia. 4ta Edición. Madrid: Thomson Paraninfo, 2003. pp.86 – 98. ISBN: 84-9732-270-3.

[5] GREENWOOD, W. Electricidad Práctica.

[6] L. VALDERRAMA, M. SANTANDER, B. ZAZZALI y M. CARMONA. Concentración Magnética Aplicada a Relaves de Cobre. Universidad de Atacama. Empresa Nacional de Minería. pp 39 - 44. Holos ISSN 1807-1600.

[7] SGS. Separación Magnética y Electrostática. Extraído: 2 de septiembre 2017. En línea: http://www.sgs.cl/es-es/mining/metallurgy-and-process-design/unit-operations-and-metallurgical-services/magnetic-and-electrostatic-separation