

UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

**COMPARACIÓN DEL DESGASTE DE LOS
CUERPOS MOLEDORES POR USO DE AGUA DE
MAR EN EL PROCESO DE MOLIENDA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PROFESOR GUÍA: PhD. LINA MARCELA URIBE VÉLEZ

PROFESOR CO-GUÍA: MSc. CARLOS MORAGA CRUZ

MAIKOL ALEJANDRO ARROYO ORTEGA

CURICÓ, CHILE

2018

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Curicó, 2020

Agradecimientos

En primer lugar, doy gracias a Dios y a mis Padres quienes son los que me permitieron llegar a esta instancia y lograr ser la persona que soy, gracias a su esfuerzo y sacrificio.

Agradezco a mis Abuelos y a todas aquellas personas que, durante estos años de estudio, de alguna forma han aportado a mi formación, principalmente como persona.

A mis Amigos; Alejandro, Martín, Claudio, Jorge y sobre todo a Sebastián con quién he trabajado arduamente día y noche para sacar adelante nuestras memorias. Ellos son quienes han hecho que este paso por la Universidad haya sido más grato y alegre.

A los Profesores por su disposición y ayuda brindada (Kenji Naito, Víctor Parra, Manuel Reyes), especialmente a los que conforman este equipo de trabajo (Lina Uribe, Carlos Moraga y Francisco Rivas).

A las personas que confiaron en mí y me instaron a seguir estudiando.

Resumen

Las enormes cantidades de agua utilizadas en las plantas de procesamiento y la escasez del recurso hídrico han llevado a las empresas mineras a instalar grandes plantas de desalinización en las costas. Desalinizar el agua y llevarla a niveles muy altos donde se ubican las plantas de procesamiento implica costos considerables de energía para las empresas, así como daños ambientales por los residuos de sal. En consecuencia, este estudio busca determinar si existe una diferencia significativa en el desgaste de los medios de molienda usando agua de mar sin desalinizar en la molienda, considerando que el desgaste de los medios de molienda representa una parte importante de los costos de operación.

En esta investigación, el proceso de molienda se realizó durante 280 horas con el fin de estudiar el efecto del agua de mar y el agua dulce en los medios de molienda. Los diferentes experimentos se realizaron en dos molinos de bolas diseñados a escala de laboratorio utilizando bolas de acero de 1 pulgada. Mineral de oro con un tamaño inferior a 150 μm se utilizó como material para la molienda. Algunas bolas fueron marcadas para ser monitoreadas. La masa y la superficie de los medios de molienda se revisaron cada 40 horas. El mineral molido se analizó a través de fluorescencia de rayos X con el fin de evaluar la presencia de impurezas debido al desgaste de los medios de molienda.

Los resultados de estas pruebas indicaron que el desgaste obtenido de los medios de molienda fue lineal en ambos medios, agua de mar y agua dulce, y se observó que el agua de mar no generó una diferencia significativa en el desgaste de los medios de molienda con respecto al agua convencional. El análisis metalográfico no mostró desgaste superficial, sin embargo, se encontraron hierro y otros elementos en el mineral proveniente de las bolas de acero, en las mismas concentraciones para ambos medios.

Palabras clave: Molino de bolas, Desgaste de bolas, Velocidad de desgaste, Agua de mar.

Abstract

The huge quantities of water used in the processing plant and the scarcity of water resources have led mining companies to install large desalination plants on the coasts. Desalinizing the water and taking it to very high levels where the processing plants are located, involves considerable energy costs for companies as well as environmental damage from salt residues. Consequently, this study seeks to determine if there is a significant difference in the wear of the grinding media using seawater without desalting in the grinding, considering that the wear of the grinding media represents an important part of the operating costs.

In this research, the grinding process was realized during 280 h in order to study the effect of seawater and fresh water in the media grinding. The different experiments were made in two ball mills designed at a laboratory scale using 1-inch steel balls. Gold ore with size below 150 μm was used as material to mill. Some balls were marked in order to be monitored. The mass and surface of grinding media were checked at every 40 h. The milled ore was analyzed through X-ray fluorescence in order to evaluate the presence of impurities due to wear of the grinding media.

The results of these tests indicated that the wear obtained in the grinding media was linear in both cases, seawater and fresh water, indicating that the seawater did not generate a significant difference in the wear of the grinding media with respect to conventional water. Metallographic analysis showed no surface wear, however, iron and other elements were found in the ore from the steel balls, in the same concentrations for both media.

Keywords: Ball mill, Ball wear, Attrition speed, Sea water.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes y motivación.....	1
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Solución propuesta	2
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo General:	3
1.4.2. Objetivos específicos:.....	3
1.5. Alcances	4
1.6. Resultados esperados.....	4
1.7. Organización del documento	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Procesos de conminución en minería	6
2.1.1. Chancado	6
2.1.2. Molienda.....	7
2.1.2.1. Molienda SAG.....	8
2.1.2.2. Molienda Convencional.....	9
2.2. Equipos empleados para procesos de molienda.....	9
2.2.1. Molino de barras.....	9
2.2.2. Molino de bolas	10
2.3. Principales partes de un Molino de Bolas	13
2.4. Factores que afectan la eficiencia de la molienda.....	14
2.4.1. Volumen de llenado de los molinos de bolas	15
2.4.2. Cálculo de carga de bolas del molino para igual diámetro de bolas.....	16

2.4.3. Cálculo de la velocidad de operación del molino.....	18
2.5. Bolas de molienda	18
2.5.1. Especificaciones de las bolas de molienda:	18
2.6. Tratamiento térmico.....	20
2.6.1. Etapas del tratamiento térmico	20
2.6.2. Tipos de tratamientos térmicos.....	21
2.6.2.1. Recocido	21
2.6.2.2. Temple	22
2.6.2.3. Revenido.....	22
2.7. Fenómenos de corrosión y desgastes que existen en procesos de molienda	23
2.7.1. Desgaste por abrasión.....	25
2.8. Problemas asociados al uso de agua en el procesamiento de minerales.	26
2.8.1. Óxido y corrosión	26
2.8.2. Algunos tipos de corrosión.....	27
2.9. Consumo de agua en la minería	30
2.9.1. Proyección de consumo de agua según su origen.....	31
2.9.2. Consumo de agua de mar en minería.....	32
2.9.3. Proyecciones de uso de agua de mar en minería	33
2.9.4. Costo económico del uso de agua desalada en la minería chilena	34
2.9.5. Aproximación al costo del uso de agua de mar en la minería chilena.....	35
2.9.5.1. Costo de la electricidad.....	35
2.9.5.2. Costo del uso de agua desalinizada	36
2.9.5.3. Uso de agua de mar directo en mineras chilenas.....	37
2.10. Estudios relacionados.....	38

2.10.1.	Medición de desgaste en función de la reducción del diámetro.....	38
2.10.2.	Análisis del desgaste de las bolas de molienda por SEM / EDX.	40
3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	42
3.1.	Materiales.....	42
3.1.1.	Muestra de relave para molienda y sus características.....	42
3.1.2.	Cuerpos moledores.....	45
3.1.3.	Medio acuoso.....	46
3.2.	Equipos y procedimientos.....	46
3.2.1.	Equipos.....	46
3.2.2.	Procedimientos.....	51
3.2.2.1.	Pruebas de molienda.....	51
3.2.2.2.	Control a cuerpos moledores.....	53
4.	RESULTADOS.....	55
4.1.	Control de peso y diámetro de los cuerpos moledores.....	55
4.2.	Análisis de Fe, Cr y Mn en el producto de molienda.....	60
4.2.1.	Balance de masas.....	63
4.3.	Análisis metalográfico de las bolas de acero.....	65
4.4.	Comparación y proyección a escala industrial de la vida útil de los cuerpos moledores en función de su diámetro.....	69
5.	CONCLUSIONES.....	72
5.1.	Recomendaciones.....	73
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	74

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Composición Química de las bolas de molienda que fabrica Moly-Cop.	19
Tabla 2.2: Dureza de las bolas de molienda que fabrica Moly-Cop.	20
Tabla 2.3: Especificaciones del molino y condiciones de operación.	39
Tabla 2.4: Datos medidos en un molino de bolas de la compañía Argos S. A.	39
Tabla 3.1: Resultados del análisis de Difracción de Rayos X para especies mineralógicas.	42
Tabla 3.2: Información obtenida del análisis granulométrico.	44
Tabla 3.3: Resultados del análisis con el equipo de FRX.	44
Tabla 3.4: Dureza de las bolas de molienda. Moly-Cop	45
Tabla 3.5: Composición química de las bolas de molienda. Moly-Cop.....	45
Tabla 3.6: Composición química de los cuerpos moledores medida con el equipo de FRX. ...	45
Tabla 3.7: Tabla de equivalencia de Hz a RPM para el molino.	47
Tabla 4.1: Registro de la masa de los cuerpos moledores utilizados en agua convencional.	55
Tabla 4.2: Registro de la masa de los cuerpos moledores utilizados en agua de mar.	56
Tabla 4.3: Registro de la pérdida de peso acumulado de los cuerpos moledores en agua convencional.	57
Tabla 4.4: Registro pérdida de peso acumulado de los cuerpos moledores en agua de mar.	57
Tabla 4.5: Resumen de datos utilizados para el análisis.	59
Tabla 4.6: Variación del diámetro respecto a las horas de operación.	60
Tabla 4.7: Concentraciones de Fe, Cr y Mn en las muestras.....	64
Tabla 4.8: Proyección del diámetro de cuerpos moledores en función de su masa y volumen.	69

Índice de Figuras

Figura 2.1: Mecanismo de conminución del chancador de Cono.....	7
Figura 2.2: Molino SAG Minera Doña Inés de Collahuasi.	9
Figura 2.3: Barras al interior de un molino.	10
Figura 2.4: Esquema básico de un molino de bolas (U. Autónoma de Coahuila, 2016).....	11
Figura 2.5: Esquema cronológico del movimiento que realiza la carga al interior del molino (Cesar Bravo, Manual de molienda y clasificación de minerales)	12
Figura 2.6: Movimientos que experimenta la carga al interior del molino (Estudio para calibración de molinos, Ociel Gutiérrez G, Universidad de Chile, 2011).....	12
Figura 2.7: Esquema de las partes de un molino (Descripción de la molienda, Erik Gallas, 2015).	14
Figura 2.8: Diagrama para el cálculo del factor de llenado de un molino de bolas.	15
Figura 2.9: Esquema explicativo de la generación de corrosión galvánica.....	28
Figura 2.10: Esquema gráfico fenómenos químicos que se producen en la corrosión por fisuras.	29
Figura 2.11: Ejemplo de corrosión por fisura o crevice.	29
Figura 2.12: Ejemplo de corrosión por picaduras.....	30
Figura 2.13: Proyección del consumo de agua en la industria minera. Fuente COCHILCO.	32
Figura 2.14: Consumo de agua de mar en la minería según el tipo de proceso. Fuente COCHILCO.....	33
Figura 2.15: Gráfico obtenido con los datos obtenidos en la Compañía Argos.	40
Figura 2.16: (A) SEM de la superficie de bola de baja aleación con tiempo de molienda igual a 90 minutos (Izq.) y análisis EDX (der.) en el punto señalado de la figura.....	41
Figura 2.17: (B) SEM de la superficie de bola de baja aleación con tiempo de molienda igual a 300 minutos (Izq.) y análisis EDX (der.) en el punto señalado de la figura.....	41
Figura 3.1: Muestreo del mineral mediante cono y cuarteo.	43
Figura 3.2: Análisis Granulométrico.	44

Figura 3.3: Imágenes tomadas con lupa estereoscópica a las bolas marcadas inicialmente.	53
Figura 4.1: Gráfica comparativa de la tendencia de desgaste parcial de los cuerpos molidores.	56
Figura 4.2: Gráfica del desgaste a partir de la pérdida de masa acumulada para ambos medios.	58
Figura 4.3: Concentración de Fe acumulado durante 280 horas de operación.	61
Figura 4.4: Concentración de Cr acumulado durante 280 horas de operación.	62
Figura 4.5: Concentración de Mn acumulado durante 280 horas de operación.	63
Figura 4.6: Masa correspondiente a cada elemento en la alimentación.	64
Figura 4.7: Masa correspondiente a cada elemento después de 20 horas de molienda.	65
Figura 4.8: Imágenes microscópicas de los cuerpos molidores en su estado inicial.	66
Figura 4.9: Imágenes microscópicas después de 280 horas de molienda en cada medio.	67
Figura 4.10: Gráfico de los datos obtenidos en la proyección para cuerpos molidores en agua convencional.	70
Figura 4.11: Gráfico de los datos obtenidos en la proyección para cuerpos molidores en agua de mar.	70

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y motivación

El consumo de los cuerpos moledores utilizados en los molinos de bolas representa una parte importante en los costos de operación de una planta de procesamiento de minerales. Según un análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre, realizado por la Comisión Chilena del Cobre el año 2015, el consumo de bolas de molienda pasaría de aproximadamente 450 a 950 mil toneladas en el periodo 2014-2025 y que el 11% de los costos de operación de una planta concentradora corresponden al consumo de bolas de molienda (COCHILCO, 2015).

El desgaste total que se produce en estos cuerpos de acero es la suma de tres conocidos mecanismos de desgaste que se originan al interior de los molinos cuando estos cuerpos giran junto al mineral; corrosión, abrasión e impacto. Las condiciones físicas que se generan por las características propias de los minerales como dureza, granulometría, densidad, forma, mineralogía y el medio en el cual se realiza la molienda ya sea seco o húmedo, contribuyen o dan paso a la ocurrencia de estos fenómenos de desgaste, siendo el medio húmedo el que genera mayor desgaste en los medios de molienda, (Lay, 2013).

Existe hoy en Chile un proyecto de ley; 10038-08 que modifica el Código de Minería en materia de uso de agua en faenas mineras y el 9185-08, establece la desalinización del agua de mar para su uso en procesos productivos mineros, apuntando a que por un lado la minería desalinice agua y que privilegie el uso de agua de mar en sus procesos, pero de forma obligatoria. La moción obliga a los proyectos mineros que usan más de 150 litros de agua por segundo, a usar agua de mar o desalada. En una primera instancia, este proyecto de ley fue rechazado por el Consejo Minero, pero se estima que en los próximos años se deberá utilizar al menos un cierto porcentaje de agua de mar en los procesos mineros, considerando además la escasez del recurso hídrico en la zona Norte de Chile, lo cual crea la necesidad de emplear agua de mar en procesamiento de minerales y que justifica el incremento de su uso en la industria (Campos, 2014).

Dado lo anterior, con este estudio se pretende evaluar el efecto que tendría el uso de agua de mar directo sobre los cuerpos molidores usados en el proceso de molienda, para determinar si existe o no una diferencia significativa en el desgaste de los cuerpos molidores y plantear el agua de mar sin desalinizar como una alternativa y una solución a la problemática de la escasez del recurso hídrico en nuestro país y considerando el alto consumo de agua que se requiere en la minería.

1.2. Descripción del problema

La escasez del recurso hídrico en nuestro país, principalmente en la zona norte, ha llevado a las empresas mineras a buscar nuevas alternativas de abastecimiento de agua para sus procesos. Una de esas alternativas, es la instalación de grandes plantas de desalinización de agua de mar en las costas de las respectivas ciudades en donde se ubican los proyectos mineros. Sin embargo, esto que inicialmente fue una solución, ha generado grandes costos energéticos debido a la necesidad de impulsar el agua desalada hasta las plantas que están a distancias y cotas muy superiores.

Por otro lado, están los costos de operación asociados al consumo por desgaste de medios de molienda en un molino de bolas, debido a los diferentes mecanismos de desgaste presentes al interior del equipo, los cuales están determinados entre otras cosas, por el nivel de dureza y microestructura de las bolas de acero y las características abrasivas y corrosivas de la pulpa (Navarro, 1991).

1.3. Solución propuesta

Se plantea realizar estudios comparativos de molienda en húmedo empleando agua de mar y agua convencional, de tal forma que permitan definir si existe un mayor o menor desgaste de los cuerpos molidores cuando se emplea agua de mar sin desalinizar en este proceso. Esto con el fin de evaluar el impacto económico que tendría el uso de estos medios en los procesos de

conminución de una planta minera y proponer alternativas de solución para mitigar este efecto. Por lo tanto, conocer el porcentaje de pérdida de masa de los cuerpos molidores, permitirá determinar la vida útil de éstos en diferentes condiciones y buscar soluciones para disminuir el impacto del desgaste que genera el medio salino en estos cuerpos o buscar alternativas como la modificación de materiales para que presenten una mayor resistencia al desgaste.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

- Estudiar el efecto que presenta el uso de agua de mar en el desgaste de los cuerpos molidores empleados en los procesos de molienda en húmedo en un molino de bolas a escala de laboratorio.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Realizar una caracterización previa de los cuerpos molidores que se emplearán en el estudio, los cuales considera: peso, diámetro de bolas, caracterización elemental e imágenes con lupa estereoscópica.
- Diseñar un montaje de un molino de bolas a escala de laboratorio para evaluar fenómenos de desgaste de las bolas de molienda.
- Evaluar fenómenos de desgaste de las bolas de molienda en función del tiempo de molienda empleando diferentes medios; agua convencional y agua de mar.
- Comparar el desgaste que se genera en las bolas de acero obtenido en los procesos de molienda realizado en agua convencional y en agua de mar.
- Determinar si el uso de agua de mar en los procesos de molienda conlleva a un mayor desgaste de las bolas de acero usadas en el proceso de molienda.

1.5. Alcances

Con este trabajo experimental se busca evaluar el desgaste que sufren las bolas de acero debido a los fenómenos de abrasión, impacto y corrosión que se generan en los procesos de molienda cuando se emplea como medio agua de mar, teniendo en cuenta los siguientes alcances y limitaciones:

- Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un laboratorio con un molino diseñado a escala de laboratorio y con bolas de molienda de tamaños proporcionales al molino, mineral fino bajo malla #70 proveniente de un relave.
- Principalmente se busca realizar un análisis comparativo del desgaste que producen los diferentes medios (agua de mar y agua convencional) en los procesos de molienda, para poder conocer si este efecto es mayor utilizando agua de mar.
- No se buscó soluciones a los problemas por desgaste de bolas de molienda, sólo se evaluó el desgaste y se definió si este efecto es mayor cuando se emplea agua de mar.

1.6. Resultados esperados

Principalmente se espera determinar experimentalmente si bajo las condiciones estudiadas existe una diferencia significativa en el desgaste de los cuerpos moledores por el uso de agua de mar en el proceso de molienda, considerando que ésta tiene una mayor concentración de sales las cuales podrían generar un mayor desgaste de las bolas de acero por corrosión.

1.7. Organización del documento

A continuación, se detalla en forma breve el contenido de los capítulos que prosiguen de este documento.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica:

- Descripción técnica de los procesos de conminución en minería.
- Descripción de los equipos utilizados para conminución de mineral.
- Descripción de los molinos de bolas.
- Revisión del estado del arte con respecto a los mecanismos de desgaste de cuerpos de moledores.

Capítulo 3: Metodología Experimental:

- Materiales y equipos utilizados para las pruebas de molienda.
- Descripción de las técnicas y procedimientos llevados a cabo para la obtención de resultados.

Capítulo 4: Resultados:

- Detalles y datos obtenidos como resultado de las pruebas experimentales en cuanto a pérdida de masa, diámetro y análisis de fluorescencia de rayos x.
- Análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 5: Conclusiones:

- Discusión, comentarios y conclusiones respecto de los objetivos propuestos y de los resultados obtenidos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Procesos de conminución en minería

El objetivo del proceso de conminución es liberar las partículas de mineral que se encuentran en forma de óxidos o sulfuros en las rocas mineralizadas, de manera que pueda continuar a otras etapas del proceso productivo. Generalmente, este proceso se realiza en grandes instalaciones ubicadas en la superficie, formando grandes complejos industriales llamadas plantas de procesamiento, y que se ubican lo más cerca posible de la mina. Algunas etapas del proceso de conminución son el chancado y la molienda (Cuadra P, 2017).

2.1.1. Chancado

El mineral proveniente de la mina presenta una granulometría variada, desde partículas de menos de 1 mm hasta fragmentos mayores que 50 cm de diámetro, por lo que el objetivo del chancado es reducir el tamaño de los fragmentos mayores hasta obtener un tamaño uniforme máximo de ½ pulgada (1,27 cm).

Para lograr el tamaño deseado de ½ pulgada, en el proceso del chancado se utiliza la combinación de tres equipos en línea que van reduciendo el tamaño de los fragmentos en etapas, las que se conocen como etapa primaria, secundaria y terciaria.

- En la etapa primaria, el chancador, por lo general de mandíbula, reduce el tamaño máximo de los fragmentos a 8 pulgadas de diámetro.
- En la etapa secundaria, el tamaño del material se reduce a 3 pulgadas con un chancador de conos.
- En la etapa terciaria, el material mineralizado logra llegar finalmente a ½ pulgada con un chancador de conos.

(Cuadra P, 2017).

Los chancadores son equipos eléctricos de grandes dimensiones. En estos equipos, los elementos que trituran la roca mediante movimientos vibratorios están contruidos de una aleación especial de acero de alta resistencia. Los chancadores son alimentados por la parte superior y descargan el mineral chancado por su parte inferior a través de una abertura graduada de acuerdo con el diámetro requerido (Figura 2.1). Todo el manejo del mineral en la planta se realiza mediante correas transportadoras, desde la alimentación proveniente de la mina hasta la entrega del mineral chancado a la etapa siguiente.

El chancador primario es el de mayor tamaño, pudiendo alcanzar dimensiones de 54' x 74', es decir 16,5 m de ancho por 22,5 m de alto. En algunas plantas de operaciones, este chancador se ubica en el interior de la mina (Cuadra P, 2017).



Figura 2.1: Mecanismo de conminución del chancador de Cono.

2.1.2. Molienda

El proceso de molienda se realiza utilizando equipos giratorios o molinos de forma cilíndrica, en dos maneras diferentes: molienda convencional y molienda SAG. En esta etapa, al material mineralizado se le agrega agua en cantidades suficientes para formar un fluido lechoso (lechada) y los reactivos necesarios para realizar el proceso siguiente que es la flotación.

Mediante la molienda, se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral y que vienen del proceso de chancado, para obtener idealmente una granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm) o dependiendo de cada mineral la que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de mena en forma de partículas individuales (Cuadra P, 2017).

2.1.2.1. Molienda SAG

La instalación de un molino SAG constituye una innovación reciente en algunas plantas. Los molinos SAG (SemiAutógenos) son equipos de mayores dimensiones que van desde los 11,0 m de diámetro por 4,6 m de ancho y son más eficientes que los molinos de bolas. Gracias a su gran capacidad y eficiencia, acortan el proceso de chancado y molienda (Figura 2.2).

El molino SAG tiene mayor capacidad y tecnología que los molinos convencionales. Muele rocas más grandes que vienen directamente del chancador primario.

El mineral se recibe directamente desde el chancador primario (no del terciario como en la molienda convencional) con un tamaño cercano a 8 pulgadas (20 cm, aproximadamente) y se mezcla con agua y cal. Este material es reducido gracias a la acción del mismo material presente en partículas de variados tamaños (de ahí su nombre de molienda semi autógena) y por la acción de numerosas bolas de acero, generalmente de 5 pulgadas de diámetro que ocupan el 12% de su capacidad. Dado el tamaño y la forma del molino, estas bolas son lanzadas en caída libre cuando el molino gira, logrando un efecto conjunto de chancado y molienda más efectiva y con menor consumo de energía por lo que, al utilizar este equipo, no se requieren las etapas de chancado secundario ni terciario.

La mayor parte del material molido en el SAG va directamente a la etapa siguiente, la flotación, es decir se logra la granulometría requerida, y una pequeña proporción debe ser enviado a un molino de bolas para alcanzar la granulometría requerida para la etapa de flotación (Cuadra P, 2017).



Figura 2.2: Molino SAG Minera Doña Inés de Collahuasi.

2.1.2.2. Molienda Convencional

La molienda convencional se realiza utilizando molinos de barras y molino de bolas, aunque en las plantas modernas sólo se utiliza el segundo. En ambos molinos el mineral se mezcla con agua para lograr una molienda homogénea y eficiente. La pulpa obtenida en la molienda es llevada a la etapa siguiente que es la flotación (Cuadra P, 2017).

2.2. Equipos empleados para procesos de molienda

2.2.1. Molino de barras

El molino de barras es muy similar al molino de bolas, pero este utiliza largas barras de acero para la molienda que van desde las 3,5 pulgadas de diámetro que son los elementos de molienda (Figura 2.3). Estos cuerpos de acero muelen el mineral a través del movimiento de estos al interior del molino. El molino de barras se puede alimentar con mineral de hasta 50 mm de diámetro.

El molino de barras gira con el material proveniente del chancador terciario, que llega continuamente por una correa transportadora. El material se va moliendo por la acción del movimiento de las barras que se encuentran libres y que caen sobre el mineral. El mineral molido continúa el proceso, pasando en línea al molino de bolas.



Figura 2.3: Barras al interior de un molino.

2.2.2. Molino de bolas

Los molinos de bolas se han usado por muchos años en las plantas de procesamiento de minerales metálicos y no metálicos. El objetivo principal es efectuar la reducción de tamaño hasta uno adecuado para liberar la mena de la ganga.

La alimentación que se envía a un molino de bolas es el producto final obtenido en un circuito de chancado. Esta no puede ser de un tamaño muy grueso, ni de uno muy fino porque la calidad del producto final afecta la eficiencia del proceso siguiente. La molienda suele efectuarse con adición de agua y la adición de reactivos químicos tales como la cal para regular el pH, depresores, y de algún reactivo de características especiales según el mineral que se está procesando (David, 2016).

Dentro del molino se tiene una carga de bolas de acero que suele ocupar entre 30 a 45% del volumen interior del molino (Figura 2.4). Esta carga puede estar compuesta de bolas del mismo diámetro o de una combinación de varios tamaños que permitan obtener un producto final adecuado. Existen relaciones matemáticas para determinar el tamaño óptimo de bolas de molienda y se basan en ciertas características del material que se alimenta, tal como la gravedad específica, tamaño máximo y tamaño del producto final. La superficie interior del cuerpo cilíndrico del molino de bolas se cubre con revestimientos de acero al manganeso, dichos revestimientos tienen una forma superficial variable al igual que su espesor, siendo la superficie ondulada la más típica. El diseño del revestimiento es importante porque permite elevar la carga de manera adecuada (David, 2016).

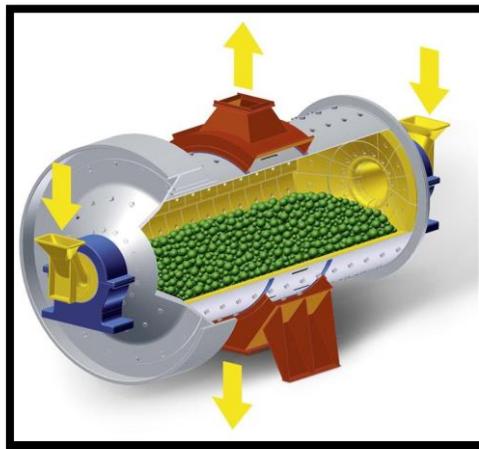


Figura 2.4: Esquema básico de un molino de bolas (U. Autónoma de Coahuila, 2016).

Una vez que se inicia la rotación del molino de bolas (Figura 2.5), se procede al ingreso del mineral, agua y productos químicos si fuera necesario. Durante el movimiento al interior del molino, se produce una mezcla constante entre los medios de molienda (bolas de acero) y el mineral. A medida que la carga avanza hacia la abertura de descarga del molino de bolas, se efectúa la reducción de tamaño. Es importante mencionar que hay dos movimientos importantes que se producen en el interior del molino, uno es el de cascada y otro el de catarata (Figura 2.6). En el caso del primero, las bolas al tomar su nivel más elevado tienden a resbalar sobre las bolas y la carga que se encuentra en un nivel inferior. En el segundo movimiento, las bolas al alcanzar su nivel más alto tienden a saltar sobre las bolas y carga ubicadas en un nivel más inferior. En el primer caso se produce una mejor molienda y reducción de tamaño, ya que hay un contacto

constante entre las partículas y las bolas, mientras que, en el segundo, la molienda no es muy eficiente por la falta de contacto. El control adecuado del flujo de mineral y la densidad de pulpa, permiten tener un movimiento adecuado de la carga dentro del molino.

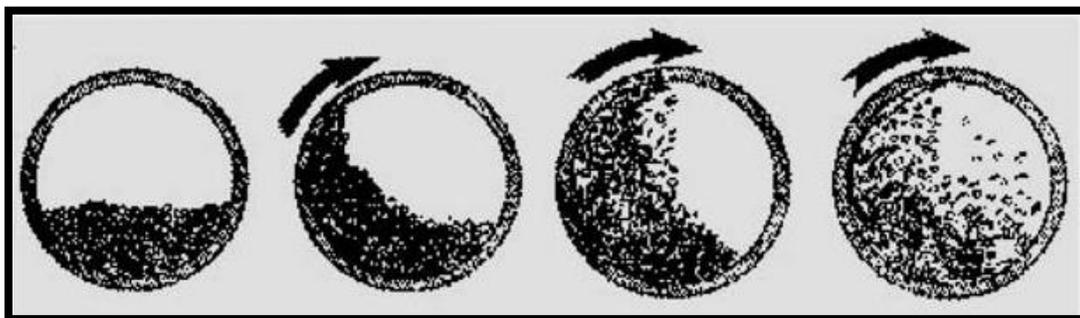


Figura 2.5: Esquema cronológico del movimiento que realiza la carga al interior del molino (Cesar Bravo, Manual de molienda y clasificación de minerales)

El producto del molino de bolas se recibe en un cajón de bomba, y se envía a un sistema de clasificación de tamaño compuesto por uno o más ciclones, según el tamaño de la planta de tratamiento de mineral, y el tamaño de partícula para el proceso de concentración. El rebose del ciclón es el producto final, y la descarga inferior contiene partículas de tamaño grueso que deben retornar nuevamente al molino para efectuar el proceso de remolienda. El ciclo molienda-clasificación se repite de manera iterativa durante la operación de la planta de tratamiento de minerales y su eficiencia afecta el proceso siguiente (concentración) (David, 2016).

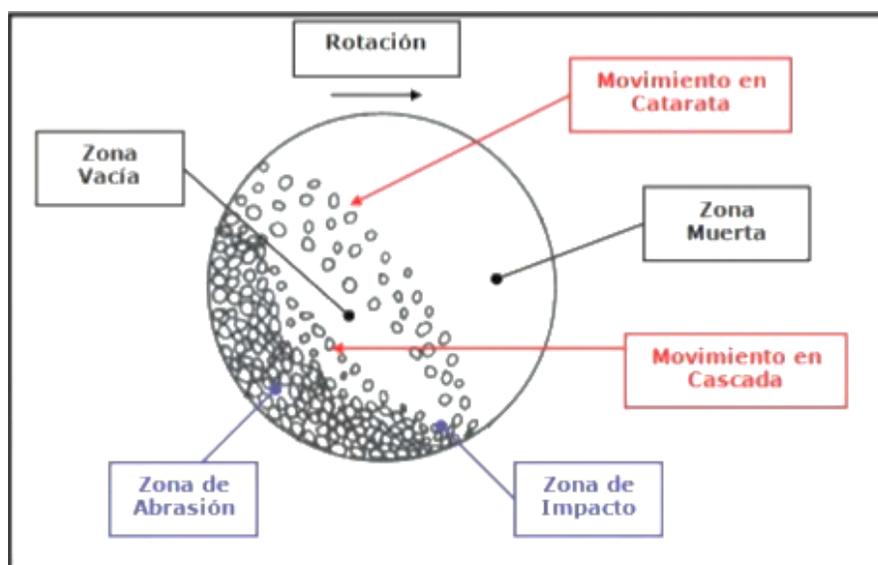


Figura 2.6: Movimientos que experimenta la carga al interior del molino (Estudio para calibración de molinos, Ociel Gutiérrez G, Universidad de Chile, 2011).

2.3. Principales partes de un Molino de Bolas

Casco: (Figura 2.7) El casco del molino está diseñado para soportar impactos y carga pesada y está construido de placas de acero forjadas y soldadas. Tiene perforaciones para sacar los pernos que sostienen el revestimiento o forros. Para conectar las cabezas de los muñones tienen grandes bridas de acero generalmente soldados a los extremos de las placas del casco, los cuales tienen perforaciones para apernarse a la cabeza (Valladares, 2008).

Los revestimientos del casco y de las tapas laterales pueden ser de las siguientes aleaciones: Decolloy, Fundición Blanca Dura, Acero eléctrico, Acero al Cromo-Molibdeno y Acero al Manganeso. Estos revestimientos son de espesor suficiente para que tenga una larga duración y un desgaste uniforme y no disminuyen la capacidad del molino de bolas (David, 2016).

Extremos: Los extremos del molino, o cabezas de los muñones pueden ser de fierro fundido gris o nodular para diámetros menores de 1 metro. Cabezas más grandes se construyen de acero fundido, el cual es relativamente liviano y puede soldarse. Las cabezas son nervadas para reforzarlas (Valladares, 2008). Los extremos de carga y descarga no están sometidos a choques y sólo debe resistir la abrasión (David, 2016).

Revestimientos: (Figura 2.7) Las caras de trabajo internas del molino consisten en revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga. Los extremos de los molinos de bolas generalmente tienen nervaduras para levantar la carga con la rotación de los molinos. Ellos impiden deslizamiento excesivo y aumentan la vida útil del revestimiento. Generalmente están hechos de fierro fundido blanco aleado con níquel y otros materiales resistentes a la abrasión, como goma. Los revestimientos de los muñones son diseñados para cada aplicación y pueden ser cónicos, planos y con espirales de avance o retardo.

Los revestimientos del molino son de un costo importante en la operación del molino y constantemente se está tratando de prolongar su vida útil. En algunas operaciones son reemplazados los revestimientos y elevadores por gomas; se ha encontrado que éstas son más durables, más fáciles y rápidas de instalar y su uso resulta en una significativa reducción del

nivel de ruido. Sin embargo, se ha observado que producen un aumento del desgaste de medios de molienda comparado con los revestimientos de acero. Así como también los revestimientos de goma pueden tener dificultades en procesos que requieren temperaturas mayores que 80°C (Valladares, 2008).

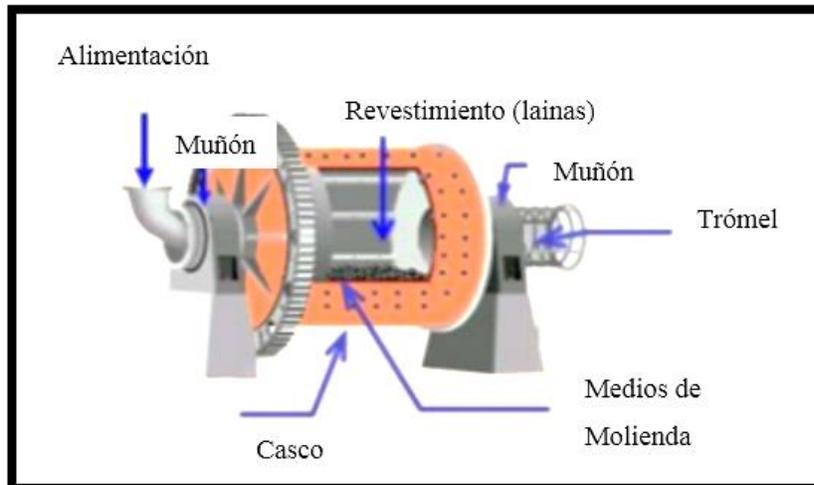


Figura 2.7: Esquema de las partes de un molino (Descripción de la molienda, Erik Gallas, 2015).

2.4. Factores que afectan la eficiencia de la molienda

Varios factores afectan la eficiencia del molino de bolas. La densidad de la pulpa de alimentación debería ser lo más alta posible, pero garantizando un flujo a través del molino. Es esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mena; una pulpa demasiado diluida aumenta el contacto metal-metal, aumentando el consumo de acero y disminuyendo la eficiencia. El rango de operación normal de la pulpa de los molinos de bolas es de 65 a 80% de sólidos, dependiendo del mineral. La viscosidad de la pulpa aumenta con la fineza de las partículas, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar densidad de pulpa menor.

La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. Luego las bolas deberían ser lo más pequeñas posibles y la carga debería ser distribuida de modo tal que las bolas más grandes sean lo suficientemente pesadas para moler la partícula más grande y dura de la alimentación. Una carga balanceada consistirá en un amplio rango de tamaños de bolas y las bolas nuevas agregadas al molino generalmente son del tamaño más grande requerido. Las

bolas muy pequeñas quedan junto con la mena molida y pueden separarse haciendo pasar la descarga por harneros (Valladares, 2008).

2.4.1. Volumen de llenado de los molinos de bolas

El volumen o nivel de la carga está relacionado con la dureza del mineral y tonelaje de alimentación que puede tratar el molino para un mismo grado de molienda. Por ejemplo, un aumento del tonelaje a tratar involucra un menor tiempo de residencia, lo que se compensa con una mayor carga de bolas, a fin de aumentar la probabilidad de contacto entre bolas y mineral. Lo mismo sucede frente a un mineral que presenta una mayor dureza.

La carga de bolas se expresa usualmente como un porcentaje del volumen del molino que es ocupado por las bolas. El cálculo de la fracción o nivel de llenado para un molino en forma cilíndrica puede hacerse una vez se conoce la altura desde la superficie de la carga hasta el tope del molino. Denominamos h a esa altura y D al diámetro interno del molino, tal como se muestra en la Figura 2.8:

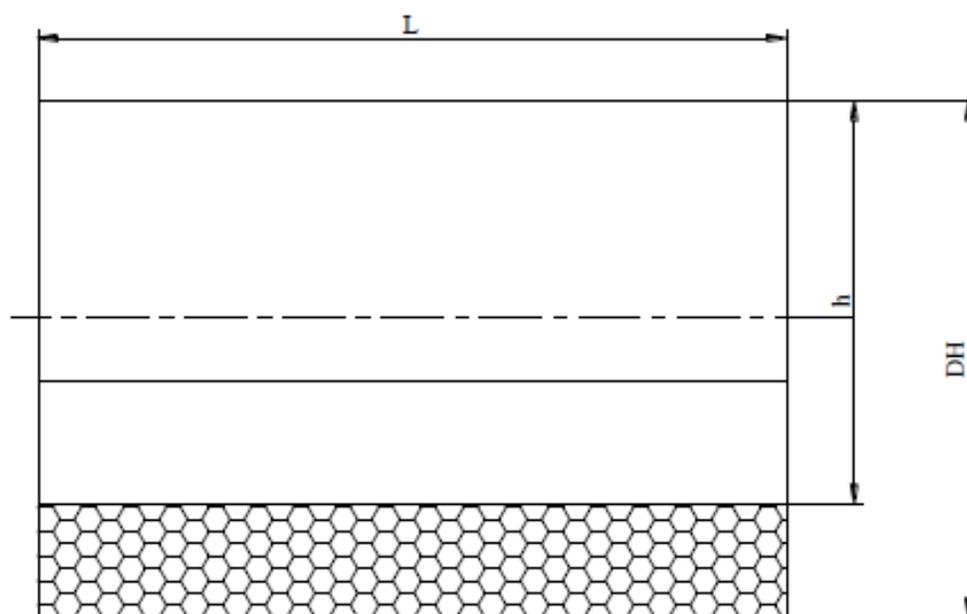


Figura 2.8: Diagrama para el cálculo del factor de llenado de un molino de bolas.

El volumen del molino ocupado por la carga está dado por el área del segmento achurado multiplicado por el largo interno del molino y la relación matemática con la que se determina el % de llenado (J):

$$J = 1.13 - 1.26 * \left(\frac{h}{D}\right) \quad (2.1)$$

h = espacio disponible sin carga de bolas

D = Diámetro del molino

Normalmente los molinos con descarga por rebalse operan con un volumen aparente de 40 a 42% del volumen total del molino, realizando cargas periódicas y controladas de bolas para recuperar aquellas gastadas durante la operación de molienda (Valladares, 2008).

2.4.2. Cálculo de carga de bolas del molino para igual diámetro de bolas

En primer lugar, se necesita conocer el volumen total del molino. Como este es de forma cilíndrica se determina su diámetro y su altura y se calcula el volumen.

Para la determinación del tamaño de las bolas, se debe seleccionar tres bolas al azar, medir su diámetro y tomar un promedio.

Teóricamente el volumen ocupado por las bolas en el molino debe ser cercano al 40%, con un factor de empaquetamiento (FE) de 0.52, el FE corresponde a la compensación de volumen por los intersticios que quedan entre bolas, por lo tanto:

$$V \text{ bolas en el molino} = V_{\text{molino}} * 40\% * FE \quad (2.2)$$

Nota: Para calcular el factor de empaquetamiento real se debe utilizar la siguiente relación:

$$FE = \frac{\text{Volumen real ocupado por los cuerpos moledores}}{\text{Volumen aparente ocupado por los cuerpos moledores}} \quad (2.3)$$

Una vez determinado el volumen que debe ocupar la carga de bolas en el molino se debe determinar el volumen de un cuerpo molidor (V_1) y posteriormente calcular cuántos son los cuerpos molidores que se requieren para completar la carga del molino junto al mineral (J).

Determinación del número de bolas.

$$\text{Número de Bolas} = \frac{V \text{ bolas en el molino}}{V_1} \quad (2.4)$$

El tamaño máximo de la carga inicial o de reemplazo se puede determinar a partir de la siguiente expresión matemática:

$$\theta = \sqrt[2]{\frac{F80}{K}} * \sqrt[3]{\left(\frac{Wi\rho}{Nc\sqrt{D}}\right)} \quad (2.5)$$

Donde:

θ = Es el diámetro de la bola en pulgadas.

K = Constante = 350 para descarga por rebose, 330 para descarga por parrilla.

La distribución por tamaños de bolas de la carga inicial se puede determinar a partir de la fórmula dada por Bond:

$$Y = 100 \left(\frac{D}{\theta}\right)^{3.81} \quad (2.6)$$

Donde:

Y = Es el porcentaje acumulado pasante del peso de bolas.

D = Es el diámetro de la bola menor a θ .

2.4.3. Cálculo de la velocidad de operación del molino

La velocidad del molino normalmente se calcula como un porcentaje de la velocidad crítica (N_c), la cual se define como la velocidad en la que la carga de bola empieza a centrifugar.

La velocidad crítica se puede calcular como una función del diámetro del molino.

$$N_c = \frac{42.2}{\sqrt{D}} \quad (2.7)$$

El rango normal de la velocidad del molino varía entre 70 y 80% de la velocidad crítica.

La forma del molino de bolas se expresa en términos de la relación longitud a diámetro L/D , usando la longitud efectiva del molino y el diámetro interior para efecto del cálculo.

2.5. Bolas de molienda

Uno de los principales problemas con respecto al uso de los molinos de bolas es equilibrar la distribución del tamaño de los medios de molienda en el molino, que está determinada por la velocidad de consumo y la tasa de reemplazo, ya que el desgaste de las bolas requiere su sustitución a intervalos. El consumo de los medios de molienda representa una parte expresiva de los costos operativos de molienda; puede alcanzar hasta el 40% de los costos en una unidad de procesamiento de minerales, y el desgaste constituye alrededor del 60% del costo en relación con los molinos de bolas. Gates & Daegush, 2008, destacan la importancia, también económica, de maximizar la vida útil no solo de los medios de molienda, sino también de los revestimientos y los elevadores en las fábricas.

2.5.1. Especificaciones de las bolas de molienda:

Las bolas de molienda tienen una microestructura martensítica, con durezas del orden de 60 RC (RockwellC). Las especificaciones técnicas de las bolas de molienda tales como su composición

química y dureza, varía de acuerdo con cada fabricante y de acuerdo con las necesidades y condiciones que requiera cada proceso de molienda. Así, se pueden encontrar bolas de acero con las siguientes características:

Tamaño: se fabrican bolas de acero forjadas en tamaños nominales que van desde 1,0” a 5,5”. Las bolas en el rango de 1,0” a 3,5” de diámetro son utilizadas en aplicaciones de molienda convencional.

Composición Química: Para cada diámetro de bola es desarrollado un perfil químico individual con el objetivo de corresponder los requerimientos de tratamiento térmico (Tabla 2.1). Se incluyen, además, adiciones de aleación específicas con el propósito de generar propiedades físicas óptimas.

Tabla 2.1: Composición Química de las bolas de molienda que fabrica Moly-Cop.

Composición Química (peso %)											
Diámetro Bola (pulg)	C		Mn		Si		Cr		Mo		Peso Nominal (g)
	Min	Max									
1.0	0.90	1.05	0.30	0.60	0.10	0.30	0.10	0.30	0.00	0.10	71
1.5	0.90	1.05	0.50	0.80	0.10	0.30	0.10	0.30	0.00	0.10	237
2.0	0.90	1.05	0.80	1.10	0.10	0.30	0.10	0.30	0.00	0.10	564
2.5	0.90	1.05	0.80	1.10	0.10	0.30	0.10	0.30	0.00	0.10	1,099
3.0	0.90	1.05	1.00	1.30	0.10	0.30	0.15	0.40	0.00	0.10	1,927
3.5	0.90	1.05	1.00	1.30	0.10	0.30	0.15	0.40	0.00	0.10	3,017
S = 0.04 Max, P = 0.03 Max											

Dureza Superficial y Volumétrica: La dureza de las bolas dependen de la microestructura del acero, que es alterado cuidadosamente a través de la utilización de tratamientos variables de calor, específicamente diseñados para cada aleación particular. La variable de control para el producto acabado es el rango de dureza. Este producto está diseñado para alcanzar la máxima durabilidad en su aplicación final (Tabla 2.2).

Densidad: La densidad de compactación teórica de las bolas en una carga es de 4520 kg/m³. (Moly-Cop, s.f.).

Tabla 2.2: Dureza de las bolas de molienda que fabrica Moly-Cop.

Dureza (Rockwell C)										
Diámetro Bola (pulg)	Superficial		1/4 de radio		1/2 de radio		3/4 de radio		Centro	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1.0	60	64	60	64	60	64	60	64	60	64
1.5	60	64	60	64	60	64	60	64	60	64
2.0	60	64	60	64	60	64	60	64	60	64
2.5	60	64	60	64	60	64	60	64	60	64
3.0	60	64	60	64	60	64	60	64	60	64
3.5	60	64	60	64	60	64	60	64	60	64

2.6. Tratamiento térmico

El Tratamiento Térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales unas propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final. No modifican la composición química de los materiales, pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales y la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas. Se pueden realizar tratamientos térmicos sobre una parte o la totalidad de la pieza en uno o varios pasos de la secuencia de manufactura. En algunos casos, el tratamiento se aplica antes del proceso de formado (recocido para ablandar el metal y ayudar a formarlo más fácilmente mientras se encuentra caliente). En otros casos, se usa para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación. Finalmente, se puede realizar al final de la secuencia de manufactura para lograr resistencia y dureza.

2.6.1. Etapas del tratamiento térmico

- **Calentamiento hasta la temperatura fijada:** La elevación de temperatura debe ser uniforme en la pieza.

- ***Permanencia a la temperatura fijada:*** Su fin es la completa transformación del constituyente estructural de partida. Puede considerarse suficiente una permanencia de unos 2 minutos por milímetro de espesor.

- ***Enfriamiento:*** Este enfriamiento tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice.

2.6.2. Tipos de tratamientos térmicos

Existen varios tipos de Tratamientos Térmicos, pero principalmente se trabajan tres de estos: Recocido, Temple y Revenido. A continuación, se presentan las principales características de cada uno de estos tipos de Tratamientos Térmicos:

2.6.2.1. *Recocido*

Es un tratamiento térmico que normalmente consiste en calentar un material metálico a temperatura elevada durante largo tiempo, con objeto de bajar la densidad de dislocaciones y, de esta manera, impartir ductilidad.

El Recocido se realiza principalmente para:

- Alterar la estructura del material para obtener las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal y mejorando su maquinabilidad.
- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Para aliviar los esfuerzos residuales.

Las operaciones de recocido se ejecutan algunas veces con el único propósito de aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causadas por los procesos de formado previo. Este tratamiento es conocido como Recocido para Alivio de Esfuerzos, el cual ayuda a reducir la

distorsión y las variaciones dimensionales que pueden resultar de otra manera en las partes que fueron sometidas a esfuerzos.

Se debe tener en cuenta que el Recocido no proporciona generalmente las características más adecuadas para la utilización del acero. Por lo general, al material se le realiza un tratamiento posterior con el objetivo de obtener las características óptimas deseadas.

2.6.2.2. Temple

El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en Austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua o salmuera), se convierte en Martensita, que es el constituyente duro típico de los aceros templados. En el temple, es muy importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo, además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica para poder obtener de esta forma la Martensita. Existen varios tipos de Temple, clasificados en función del resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan casi todos los aceros, llamada Templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero (Garavito, 2008).

2.6.2.3. Revenido

El Revenido es un tratamiento complementario del Temple, que generalmente prosigue a éste. Después del Temple, los aceros suelen quedar demasiados duros y frágiles para los usos a los cuales están destinados. Lo anterior se puede corregir con el proceso de Revenido, que disminuye la dureza y la fragilidad excesiva, sin perder demasiada tenacidad (Garavito, 2008).

2.7. Fenómenos de corrosión y desgastes que existen en procesos de molienda

El desgaste de los medios de molienda en el procesamiento húmedo es el resultado de los mecanismos de abrasión, corrosión, impacto y compresión. Sin embargo, la contribución relativa de cada uno de estos mecanismos aún no se ha establecido perfectamente (Radziszewski, 2002). La gran cantidad de variables involucradas, así como su interacción, combinadas con la dificultad de observar directamente estas variables, hacen que la cuantificación del desgaste de los medios de molienda sea un desafío considerable (Chris, 2013). La Universidad de Sharhrood, Irán, el año 2015 publicó los resultados de una investigación acerca de la influencia de la química de la molienda en el desgaste de los medios de molienda, concluyendo que la corrosión representa un 26.68% del desgaste total de las bolas de acero (Azizi, 2015).

La molienda seca se emplea cuando el agua es escasa o es importante no mojar el material a moler, como en el caso del cemento o la sal, dado que la presencia de agua en el proceso afectaría el producto. La molienda en seco se emplea también cuando se intenta minimizar la contaminación del producto de molienda por la presencia de hierro proveniente de los medios de molienda y revestimientos.

Generalmente la molienda es realizada en húmedo. Dado que la adición de agua para formar la lechada ayuda a mover la carga de mineral al interior del molino, disipa el calor de la operación y evita la generación de polvo. Sin embargo, el contacto de minerales con agua libera iones en solución los cuales favorecen el desgaste por corrosión. Por lo tanto, en la molienda en húmedo, hay un cambio en el orden de magnitud del desgaste, frecuentemente atribuido a la ocurrencia de corrosión, ya que estos iones pueden agregar un componente de desgaste corrosivo, que actuará en sinergia con el componente abrasivo (Peres Massola, 2016).

Bond estimó que el desgaste de las bolas de molienda en la molienda húmeda es siete veces mayor que el verificado en la molienda en seco (Bond, 1964). Iwasaki I, 1988, sin embargo, llama la atención sobre el hecho de que los mecanismos de molienda en seco son esencialmente distintos de los de la molienda en húmedo. En la molienda en seco, las partículas minerales se adhieren fuertemente a las bolas, cubriéndolas y limitando la exposición continua de su

superficie a la abrasión. En la molienda húmeda, la lechada debe tener un porcentaje de sólidos para cubrir las bolas y así evitar el contacto directo de las superficies metálicas, pero a la vez no debe dificultar el movimiento de los medios de molienda, esto reduciría drásticamente la eficacia de la molienda. Por lo tanto, los datos obtenidos en la molienda en seco no se pueden usar para representar el componente abrasivo del desgaste en la molienda en húmedo (Peres Massola, 2016).

Aunque la ocurrencia de la corrosión en los procesos de molienda en húmedo es casi consensual, su importancia no está bien documentada. Los resultados obtenidos por algunos investigadores sugieren que la corrosión no sólo es importante, sino que también puede ser el proceso dominante de eliminación de metales en la molienda en húmedo. En la molienda por lotes a escala de laboratorio, la corrosión puede representar del 25 al 75% del desgaste metálico, dependiendo del mineral, el metal y las condiciones ambientales involucradas (Chenje, 2003).

De hecho, la molienda húmeda reúne todos los elementos necesarios para la ocurrencia de un proceso de corrosión activo: gran área superficial de los medios de molienda, un área de superficie de mineral que se muele, un potencial de corrosión y abrasión continua que elimina cualquier película protectora que pueda haberse formado en la superficie de los medios de molienda. Además, el desgaste abrasivo produce superficies frescas, listas para sufrir corrosión, y el producto de corrosión se elimina fácilmente por los diferentes mecanismos de abrasión. Las celdas galvánicas locales pueden tener lugar entre los medios de trituración y la suspensión, que se alivia en presencia de oxígeno (Peres Massola, 2016).

Nataranjan, 1996, propuso un modelo de corrosión para los medios de molienda, que involucra dos tipos de celdas galvánicas. En la celda de abrasión diferencial, la superficie erosionada actúa como un ánodo, mientras que la superficie no erosionada actúa como un cátodo, y las reacciones de corrosión correspondientes son la oxidación del hierro en la primera área y la reducción de oxígeno en la segunda. El segundo modelo involucra la interacción galvánica entre el mineral y la bola de molienda. Las partículas minerales (principalmente sulfuros) actúan como cátodos y las bolas como ánodos, y este acoplamiento galvánico acelera el desgaste.

La sinergia entre la abrasión y la corrosión incluye tanto los efectos de la corrosión en el aumento del desgaste abrasivo, como la influencia de este último en la aceleración de la corrosión. Por ejemplo, la corrosión puede aumentar la tasa de desgaste de un metal cuando genera productos que se adhieren débilmente a la superficie y que pueden eliminarse fácilmente por abrasión. Esta última, a su vez, puede acelerar puntualmente la corrosión al romper la película de pasivación superficial frágil que protege las aleaciones metálicas contra la corrosión. En ese caso, la aceleración del proceso corrosivo dependerá de la tasa de repasivación (resistencia a la corrosión) y de la intensidad del desgaste (Landolt D, 2001). Varios materiales aprovechan su capacidad de formar una película para resistir la corrosión. Esta película se llama capa pasiva, formada por óxidos, y constituye una barrera para la transferencia de carga entre la superficie metálica activa y el entorno corrosivo, por lo que la velocidad de corrosión es tan baja que la corrosión es apenas perceptible. La presencia de algunos aniones en aguas industriales puede tener un efecto sobre la corrosión, y los iones cloruro son los más perjudiciales para los medios de molienda (Peres Massola, 2016).

2.7.1. Desgaste por abrasión

La abrasión es el principal mecanismo de desgaste en la minería, así como en las operaciones de procesamiento de minerales. El desgaste resultante de la abrasión se denomina desgaste abrasivo, definido como la pérdida de material debido a partículas duras o protuberancias que se fuerzan y se mueven a lo largo de una superficie sólida. Por lo tanto, en el desgaste abrasivo, una partícula suficientemente dura ataca la superficie metálica en un ángulo favorable y actúa como una herramienta de corte, eliminando los desechos. El paso sucesivo del grano abrasivo repite estos desplazamientos cíclicamente, lo que conduce a la eliminación de material debido a la baja fatiga del ciclo. El primer mecanismo, el microcorte, es mucho más efectivo y se ve favorecido por las siguientes características del mineral: alta dureza, gran tamaño de grano y forma angular. La presencia de arañazos, riesgos y surcos en la superficie desgastada puede ser indicativo de la apariencia de desgaste por abrasión. El origen de las partículas abrasivas puede ser tan diverso como el desgaste. Considerando un sistema de molienda en húmedo, los elementos abrasivos serían las propias partículas minerales (Peres Massola, 2016).

El desgaste tanto de los revestimientos como de las bolas de molienda es abrasivo producto del contacto entre las rocas y el acero. Este tipo de desgaste provoca remoción de material producto de la interacción mecánica entre las superficies que puede ocurrir de 2 maneras, la primera es por el roce de una superficie de mayor dureza con otra y la segunda es por partículas abrasivas entre 2 cuerpos (Araneda, 2013).

2.8. Problemas asociados al uso de agua en el procesamiento de minerales.

2.8.1. Óxido y corrosión

El óxido es el resultado de una reacción química donde el oxígeno del aire y el disuelto en el agua de mar se combina con el hierro para crear óxido férrico. Lo anterior ocurre debido a que el hierro busca su estado más estable en forma de óxido de hierro combinado con el oxígeno.

Es importante distinguir dos clases de corrosión: la Corrosión Seca y la Corrosión Húmeda. La corrosión se llama seca cuando el ataque se produce por reacción química, sin intervención de corriente eléctrica. Se llama húmeda cuando es de naturaleza electroquímica, es decir que se caracteriza por la aparición de una corriente eléctrica dentro del medio corrosivo. A grandes rasgos la corrosión química se produce cuando un material se disuelve en un medio líquido corrosivo hasta que dicho material se consuma o, se sature el líquido. La corrosión electroquímica se produce cuando al poner ciertos metales con alto número de electrones de valencia, con otros metales, estos tienden a captar dichos electrones libres produciendo corrosión (Hernández, 2002).

Cuando la oxidación se produce en un ambiente húmedo, la reacción es mucho más efectiva al producirse un efecto electroquímico acelerado por la sal disuelta en el agua de mar. Además, debido a las corrientes eléctricas producidas por efectos de fricción o por la utilización de metales diferentes, la formación de óxido se ve favorecido debido al potencial eléctrico que se genera (Hernández, 2002).

2.8.2. Algunos tipos de corrosión

La corrosión electroquímica

La corrosión es un proceso electroquímico en el cual un metal reacciona con su medio ambiente para formar óxido o algún otro compuesto. La celda que causa este proceso está compuesta esencialmente por tres componentes: un ánodo, un cátodo y un electrolito (la solución conductora de electricidad). El ánodo es el lugar donde el metal es corroído: el electrolito es el medio corrosivo; y el cátodo, que puede ser parte de la misma superficie metálica o de otra superficie metálica que esté en contacto, forma el otro electrodo en la celda y no es consumido por el proceso de corrosión. En el ánodo el metal corroído pasa a través del electrolito como iones cargados positivamente, liberando electrones que participan en la reacción catódica. Es por ello que la corriente de corrosión entre el ánodo y el cátodo consiste en electrones fluyendo dentro del metal y de iones fluyendo dentro del electrolito.

Aunque el aire atmosférico es el medio más común, las soluciones acuosas son los ambientes que con mayor frecuencia se asocian a los problemas de corrosión. En el término solución acuosa se incluyen aguas naturales, suelos, humedad atmosférica, lluvia y soluciones creadas por el hombre. Debido a la conductividad iónica de estos medios, el ataque corrosivo es generalmente electroquímico (Hernández, 2002).

La corrosión galvánica

La corrosión Galvánica es una de las más comunes que se pueden encontrar. Es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos (con distinto par redox) se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (por ejemplo, una solución conductiva) (Figura 2.9).

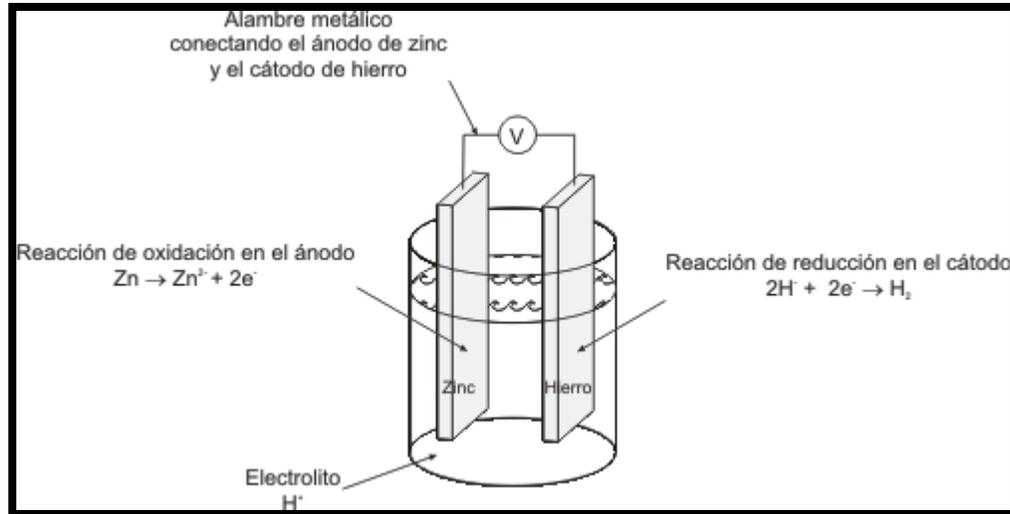


Figura 2.9: Esquema explicativo de la generación de corrosión galvánica.

El ataque galvánico puede ser uniforme o localizado en la unión entre aleaciones, dependiendo de las condiciones. La corrosión galvánica puede ser particularmente severa cuando las películas protectoras de corrosión no se forman o son eliminadas por erosión.

Mientras más grande es la diferencia de potencial entre los metales, mayor es la probabilidad de que se presente la corrosión galvánica debiéndose notar que este tipo de corrosión sólo causa deterioro en uno de los metales, mientras que el otro metal del par casi no sufre daño. El metal que se corroe recibe el nombre de metal activo, mientras que el que no sufre daño se le denomina metal más noble. La relación de áreas entre los dos metales es muy importante, ya que un área muy grande de metal noble comparada con el metal activo acelerará la corrosión y, por el contrario, una mayor área del metal activo comparada con el metal noble disminuye el ataque del primero.

Esta forma de corrosión es la que producen las Celdas Galvánicas. Sucede que cuando la reacción de oxidación del ánodo se va produciendo se van desprendiendo electrones de la superficie del metal que actúa como el polo negativo de la pila (el ánodo) y así se va produciendo el desprendimiento paulatino de material desde la superficie del metal. Este caso ilustra la corrosión en una de sus formas más simples (Hernández, 2002).

Corrosión por Fisuras o “Crevice”

La corrosión por crevice o por fisuras es la que se produce en pequeñas cavidades o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no-metálico. En las fisuras de ambos metales, que también pueden ser espacios en la forma del objeto (Figura 2.11), se deposita la solución que facilita la corrosión de la pieza. Se dice, en estos casos, que es una corrosión con ánodo estancado, ya que esa solución, a menos que sea removida, nunca podrá salir de la fisura (Figura 2.10). Además, esta cavidad se puede generar de forma natural producto de la interacción iónica entre las partes que constituyen la pieza (Hernández, 2002).

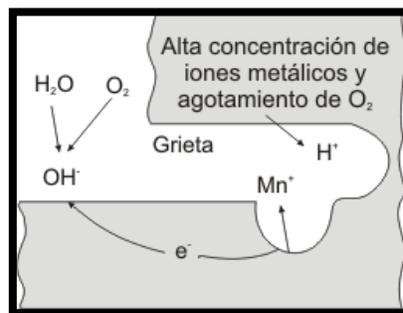


Figura 2.10: Esquema gráfico fenómenos químicos que se producen en la corrosión por fisuras.



Figura 2.11: Ejemplo de corrosión por fisura o crevice.

Corrosión por picadura

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente inatacada y las picaduras pueden tener varias formas (Figura 2.12). La forma de

una picadura es a menudo responsable de su propio avance, por las mismas razones mencionadas en la corrosión por agrietamiento, es decir, una picadura puede ser considerada como una grieta o hendidura formada por sí misma. Para reducir la corrosión por picadura se necesita una superficie limpia y homogénea, por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida deberá ser generalmente, mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones, defectos o rugosidad. La corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente, causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales. La limpieza de la superficie y la selección de materiales conocidos, resistentes a la formación de picaduras en un medio ambiente determinado, es generalmente el camino más seguro para evitar este tipo de corrosión (Hernández, 2002).



Figura 2.12: Ejemplo de corrosión por picaduras.

2.9. Consumo de agua en la minería

El agua es un insumo fundamental para la minería, ya que es necesaria en muchas etapas del proceso productivo. En términos comparativos, la industria minera no es uno de los principales consumidores de agua del país, con un consumo que asciende al 3% del agua total consumida en Chile. Sin embargo, la mayor parte de las actividades mineras se ubican en la zona del Norte Grande (un 78% de las empresas de extracción de cobre), donde está solamente el 0,13% de la escorrentía de agua nacional, se tiene un clima semi-árido con 87 mm por año de precipitaciones, y cuenta con la presencia de vegas y bofedales, los cuales son ecosistemas únicos, frágiles y de

gran valor ecológico a nivel nacional. Por otro lado, el agua es un insumo fundamental para las personas y el medio ambiente. Es fundamental para la supervivencia y salud humana, para la mantención de cultivos y animales, y para la mantención de ecosistemas sensibles (COCHILCO, 2017).

2.9.1. Proyección de consumo de agua según su origen

Los orígenes del agua pueden ser dos, agua continental, que abarca aguas superficiales, subterráneas y adquiridas de terceros, o agua de mar, que abarca agua desalada y agua salada. La proyección por origen se puede ver en la Figura 2.13. Se puede ver también en esta figura que el uso de agua de mar se espera que tenga un fuerte crecimiento (cerca del 289,9%) mientras el uso de agua continental tiene un leve decrecimiento (del 6,3%) en el período entre el 2016 y 2028. El consumo total de agua tiene un aumento del 49,7% en el mismo periodo. El aumento del consumo de agua de mar se explica por una serie de plantas desaladoras que se planea construir. Dentro de ellas destacan las plantas de BHP, Escondida Water Supply y Spence Growth Project para el 2017 y 2019 respectivamente; la de Codelco Norte, Distrito Norte, para el 2021; y la de Teck, Quebrada Blanca fase 2 para el 2021.

En la Figura 2.13 se destaca la estabilidad en el consumo de agua continental hasta el año 2022, en donde deja de operar Chuquicamata rajo y empieza a operar Chuquicamata subterráneo, la cual contempla uso de agua de mar. Además, ese mismo año dejaría de operar RT Sulfuros Fase I, para luego entrar en operación la Fase II de RT sulfuros que también contempla el uso de agua de mar (COCHILCO, 2017).

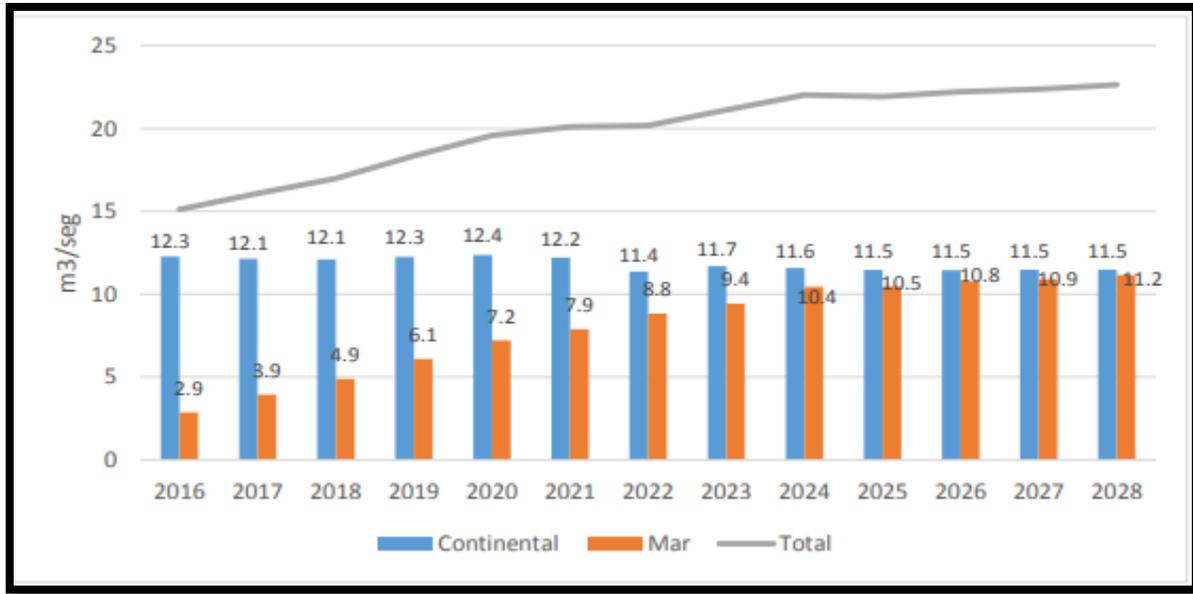


Figura 2.13: Proyección del consumo de agua en la industria minera. Fuente COCHILCO.

2.9.2. Consumo de agua de mar en minería

El uso de agua de mar que se proyecta para los próximos diez años, es principalmente para abastecer el proceso de concentración por flotación (Figura 2.14). En el 2016, de los 2,86 m³/seg de agua de mar que se usaron en la minería, un 82,1% fue utilizado en este proceso. El total del agua de mar que se consumirá en el 2028 subirá a 11,16 m³/seg, de los cuales un 90% será para el proceso de concentración. Es decir, el uso aumentaría en un 328,8% en los próximos 10 años. Los demás procesos que usan este medio son, la hidrometalurgia, con un promedio del 14,5% del consumo en el período de proyección, y otros procesos (o servicios) con un uso promedio de 2,4% en el periodo de proyección.

Como se mencionó anteriormente, el año 2028 el agua de mar representará cerca de la mitad del agua consumida en minería. Cabe destacar que hoy la minería recircula un alto porcentaje de agua (más del 70%) debido a la escasez de esta. Esto produce externalidades positivas ya que los relaves que se descartan tienen un menor contenido de humedad, lo cual provoca que sean menores en volumen y que sean más estables.

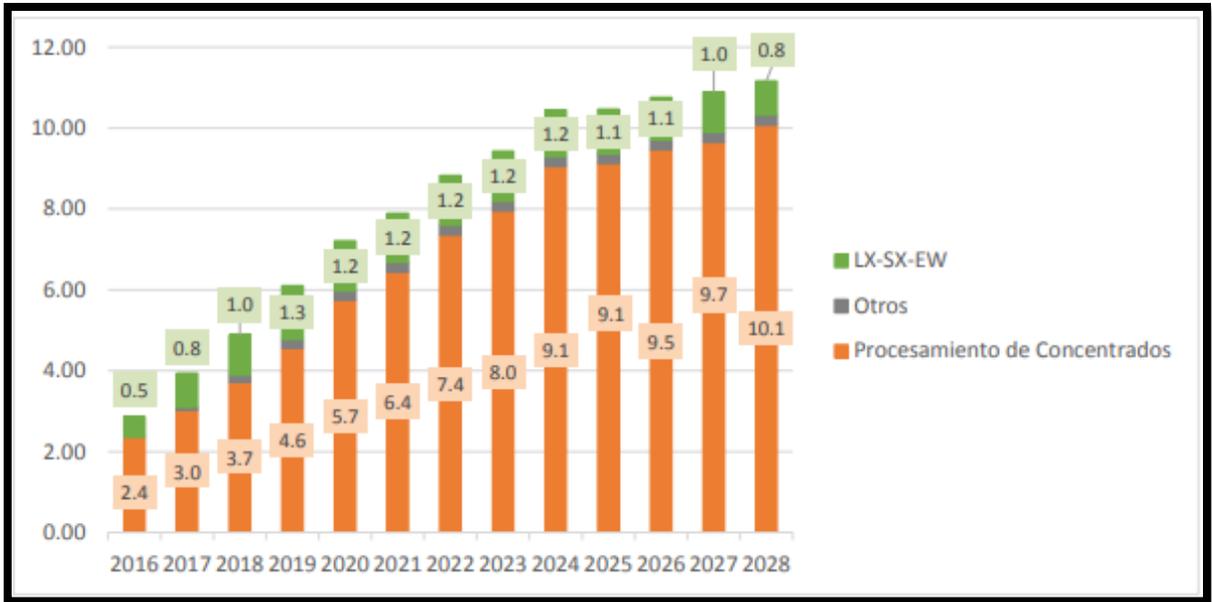


Figura 2.14: Consumo de agua de mar en la minería según el tipo de proceso. Fuente COCHILCO

Dado que el agua de mar es un recurso abundante, es necesario que esta tenga una adecuada gestión para que no disminuya el nivel de recirculación de los procesos actuales, ya que el uso de agua de mar, si bien soluciona el tema de la cantidad de agua, no soluciona los problemas asociados a deterioro de la calidad del agua (COCHILCO, 2017).

2.9.3. Proyecciones de uso de agua de mar en minería

Uno de los principales resultados de la proyección es el fuerte aumento del uso de agua de mar en los procesos mineros, sobre todo para los procesos de concentración. Al 2028 el uso de agua de mar aumentaría en un 289,9%, mientras el uso de agua continental decrece en un 6,3%. Se puede ver que la mayoría del agua de este origen se consumirá en la región de Antofagasta, la cual reducirá drásticamente su consumo de agua continental (en un 55%). Considerando que el año 2016 Antofagasta era la región que más consumía agua continental (de manera absoluta, no ponderada), esta reducción seguramente marcará una diferencia en la región, que dejaría de consumir 2,56 m³/seg. De manera general, el proceso de concentración es el que más aumentaría su consumo de agua total (continental y de mar), y lo hace en un 74,7% en el periodo del 2016 al 2028. En el mismo período, el proceso hidrometalúrgico disminuiría su consumo de agua

total en un 51,7%. Esto último es, definitivamente, de gran ayuda para la disponibilidad de agua para otros usos (cantidad de agua), sin embargo, el uso de agua de mar no resuelve el problema de la calidad del agua para la minería, la cual, luego de ser usada queda cargada de metales, reactivos propios de la concentración, ácidos y otros químicos. Se reitera que el nivel de recirculación que tiene la minería chilena es alto y, para evitar un aumento de problemas por calidad de agua, esta tasa de recirculación debe mantenerse o aumentar.

Si bien el uso de agua de mar aparece como una solución estratégica a la escasez hídrica existente en el país, se deben también considerar los potenciales impactos al medio ambiente marino, por lo que es necesario tener una mirada integral que siga otras fuentes de reciclo de agua, tal como uso de aguas grises o de descarte de tratamiento de aguas servidas, además de nuevas técnicas que reduzcan ese potencial impacto (COCHILCO, 2017).

2.9.4. Costo económico del uso de agua desalada en la minería chilena

La escasez hídrica en el norte del país ha llevado a las principales mineras a utilizar agua de mar en sus procesos y a la vez, buscar alternativas tecnológicas para su desalinización y reutilización, al respecto, COCHILCO estimó que al año 2027 el consumo de agua será de 20,1 m³/seg, y el 46% correspondería a agua de mar. (COCHILCO, 2017).

El Consejo Minero estimó, en 2013, que en promedio las firmas chilenas pagan US\$ 5,1 por m³ de agua de mar desalada puesta en la mina, mientras que la misma unidad de agua fresca costaba US\$ 1,6. El costo del agua de mar desalada en Chile es mayor a los 2,3 US\$/m³ que cuesta en Estados Unidos o a los 2,8 US\$/m³ en México.

En consideración al alto costo de inversión y al propio del proceso de desalinización de agua al cual se enfrenta la minería chilena, COCHILCO planteó que, a escala regional, el compartir la red de tuberías e infraestructura de desalinización para el suministro de agua de mar entre las distintas empresas de minería parece una propuesta lógica para un menor consumo de energía y la disminución de los costos financieros (COCHILCO, 2017a)

2.9.5. Aproximación al costo del uso de agua de mar en la minería chilena

Al analizar los costos en los que deben incurrir las mineras para incluir en su actividad el uso de agua de mar desalinizada, se debe diferenciar entre aquellos correspondientes a la inversión necesaria para la construcción e instalación de una planta desalinizadora, y los costos propios del proceso de desalinización del agua de mar. En términos generales, los costos de capital y de producción del agua desalinizada son dependientes del tamaño de planta y del flujo de producción, existiendo economías de escala. Por lo anterior, no es extraño encontrar que en la industria minera chilena se hayan realizado inversiones de distinta envergadura. Por ejemplo, en 2006 BHP Billiton invirtió US\$ 60 millones en una planta desaladora con una capacidad de 525 lts/seg en Antofagasta, mientras que para el 2013 inició una inversión de US\$ 3.430 millones para una planta que producirá 2.500 lts/seg. Ahora bien, en cuanto a la producción y uso de agua de mar desalada en la operación minera, se considera que existen cuatro determinantes del costo de desalar e impulsar el agua de mar a la faena minera; volumen de agua tratada; cota de la faena; la distancia de costa a faena; y el costo de la energía eléctrica (COCHILCO, 2017)

Específicamente en la minería chilena se da el caso en que, pese a la factibilidad comprobada de las plantas desalinizadoras, la necesidad de impulsar agua desalada a las faenas mineras (alejadas y en altura) hace que los proyectos sean costosos por lo que implica la impulsión del agua desde la zona costera hasta las propias faenas, en su mayoría ubicadas sobre los 2.000 metros sobre el nivel del mar, y a una distancia de la costa de casi 120 km (Revista Minería Chilena, 2016).

2.9.5.1. Costo de la electricidad

En 2011 la energía eléctrica representó el 9% de los costos operacionales de las empresas de la gran minería del cobre en Chile (COCHILCO, 2017a).

En cuanto al proceso de desalinización del agua de mar, existe una estrecha relación entre el uso de agua de mar y el consumo energético, a tal punto que el costo del agua se transforma ineludiblemente en costo energético (COCHILCO, 2017a). Por ejemplo, según la experiencia del Grupo CAP, la energía requerida para el proceso de desalinización representa el 67% del costo, mientras que para el bombeo de agua, que requiere un altísimo consumo de energía, representa el 97% del total del costo operacional del transporte.

En esta perspectiva, el año 2016 el consumo de energía en minería, reportado por COCHILCO, fue de 21,9 Tera Watts - Hora (TWh), donde el 4% del total (0,86 TWh) se usó para obtener agua de mar a través de desalinización e impulsión (COCHILCO, 2016).

Por tanto, ante una creciente demanda de energía por parte de las mineras, COCHILCO proyectó que para el año 2027 el consumo total de energía sería de 29,5 TWh, donde un 9% (2,69 TWh) correspondería al uso de agua de mar, pasando a ser el segundo proceso que más demandará energía (COCHILCO, 2016).

2.9.5.2. Costo del uso de agua desalinizada

Dependiendo de la capacidad de tratamiento de la planta, el costo total de desalinización oscilaría entre los 0,6 y 1,2 US\$/m³. Sin embargo, como es de esperar, el metro cúbico de agua desalada tiene un costo menor si está en la costa (US\$ 1), y sube conforme se bombea hacia el interior. En zonas de altura, donde están varias mineras, puede llegar a costar entre US\$ 8 y US\$ 10 m³ (Economía y Negocios, 2015).

Concretamente para el caso chileno, el Consejo Minero, indicó el 2016 que el costo de producción e impulsión del agua de mar desalada al yacimiento minero estaría en torno a US\$5 por m³. Específicamente, se indicó que en promedio las firmas pagan 5,1 US\$/m³ de agua de mar desalada puesta en la mina, cifra que es considerablemente mayor a la misma unidad de agua fresca que costaría 1,6 US\$/m³. El mayor costo del uso de agua de mar desalada en la minería (5,1 US\$/m³) se explicaría por 1,5 US\$/m³ propio del sistema de desalinización y 1,8 US\$/m³ por sistema de transporte, respectivamente.

A partir del mismo estudio, se desprende que por implicancias directas de las cotas en las cuales se encuentran las faenas, el costo de energía eléctrica y la distancia desde la costa a faena, el costo de la desalinización en Chile sería dos veces más caro que en Estados Unidos, país en donde costaba solo 2,3 US\$/m³, y que en México en donde ascendía a 2,8 US\$/m³. Por tanto, en el caso chileno el alto costo está determinado por la energía asociada al transporte del agua a los yacimientos.

2.9.5.3. Uso de agua de mar directo en mineras chilenas

Debido a los puntos anteriores, el uso de agua de mar sin desalar ha cobrado fuerza como una opción atractiva. Minera Tocopilla, Minera Las Luces y Minera Michilla, son algunas de las faenas que emplean este recurso directamente en sus procesos, pero la experiencia de mayor envergadura hasta ahora la constituye el caso de Minera Esperanza, de Antofagasta Minerals, que inició su operación comercial a fines de 2011.

En cuanto a los ajustes que demandó el uso de agua de mar en la planta de flotación, la configuración de esta unidad es similar a otras instalaciones de su tipo, pero sí se requirió un cambio significativo en materia de extractivos. Por ejemplo, que no se emplea cal, que es el reactivo normal en la flotación de cobre, está demostrado que su uso con agua de mar sin desalar inhibe la recuperación de cobre y sobre todo afecta la de metales preciosos (LatinoMinería, 2013).

Los resultados han sido positivos, registrando recuperaciones de cobre por sobre el benchmarking en Chile. En el caso del oro, se ubican sobre el 80%. Un tema pendiente son las pruebas para recuperación de molibdeno, que Minera Esperanza espera producir también en unos años más, cuando las leyes del mineral comiencen a subir.

Otro desafío que se tuvo que abordar en la etapa de aprendizaje fue el de la separación de sólidos y líquidos en los relaves y concentrados, debido a que el agua de mar tiene una densidad levemente mayor al agua convencional, por lo que requirió algunos ajustes en esta etapa.

Vinculado con esto, una característica importante que se encontró al momento de depositar relave, es que éste se fue secando y se formó una costra de gran dureza, lo que hizo que la generación de polvo fuera prácticamente nula lo cual es una ventaja sustantiva, pues los tranques de relave son una de las principales fuentes de generación de polvo en la minería del norte de Chile (LatinoMinería, 2013). En resumen, la experiencia de Esperanza ha demostrado que el uso directo de agua de mar es una opción viable para la minería.

2.10. Estudios relacionados

2.10.1. Medición de desgaste en función de la reducción del diámetro.

Se realizó un seguimiento del desgaste de medios molidores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos S.A. En esta investigación, las medidas de desgaste se hicieron a dos tipos de bolas con una composición química diferente, la base de datos fue tomada de un molino industrial utilizado para el proceso de molienda en húmedo. El análisis de la base de datos se hizo bajo el programa Matlab para mirar el tipo de curva que mejor se ajusta a los datos, la variable analizada fue la disminución del diámetro en el tiempo, todo esto con el fin de obtener una ecuación constitutiva que serviría para obtener la velocidad de desgaste de las bolas al interior del molino. Y posteriormente esta podrá ser utilizada para encontrar el flujo de bolas a reponer diariamente en el molino, la distribución másica de bolas, entre otras. La metodología utilizada para tomar las medidas del desgaste fue bajo el método de bola marcada, las bolas fueron entregadas perforadas de fabricación por la compañía Indú Vega Industries. Como resultado en general se obtuvo que la mejor curva que aproxima los datos experimentales es una curva de tendencia lineal y se comprobó la hipótesis propuesta por algunos autores que la cinética de desgaste de las bolas es constante (E.Rivera, 2012).

En la Tabla 2.3 se muestran las condiciones de operación bajo las cuales se llevó a cabo el seguimiento del desgaste en el estudio antes mencionado.

Tabla 2.3: Especificaciones del molino y condiciones de operación.

Dimensiones internas	3500 mm * 5100 mm
Tipo de descarga	7 mm
Fracción de velocidad crítica de giro	72,5%
Flujo de alimentación fresca al molino	66 t/h
Flujo de alimentación total al molino	165 t/h
Índice de trabajo operacional del mineral	12 Kwh/t
F-80	19000 um
P-80	195 um
Fracción de volumen carga de bolas	32%
Masa total de carga de bolas	48,62 t
Consumo de bolas	143 gr/t
Secuencia de recarga Kg/día del ciclo	1000 Kg cada 7 días
Composición granulométrica de la recarga	100% de 3,5"

La Tabla 2.4 muestra el diámetro que se registró en el molino de bolas industrial, durante 3461 horas de operación. Las dimensiones del molino son 3,5 metros de diámetro por 5,1 metros de largo en donde se utilizaron bolas de 3,5 pulgadas. La Figura 2.15 muestra la gráfica obtenida con estos datos y la ecuación de la recta la cual indica la tendencia de disminución del diámetro de los cuerpos moledores para este equipo.

Tabla 2.4: Datos medidos en un molino de bolas de la compañía Argos S. A.

Horas	Diámetro (cm)
0	8.90
601	8.70
1363	8.40
1551	8.30
1910	8.10
2432	8.00
2927	7.70
3461	7.50

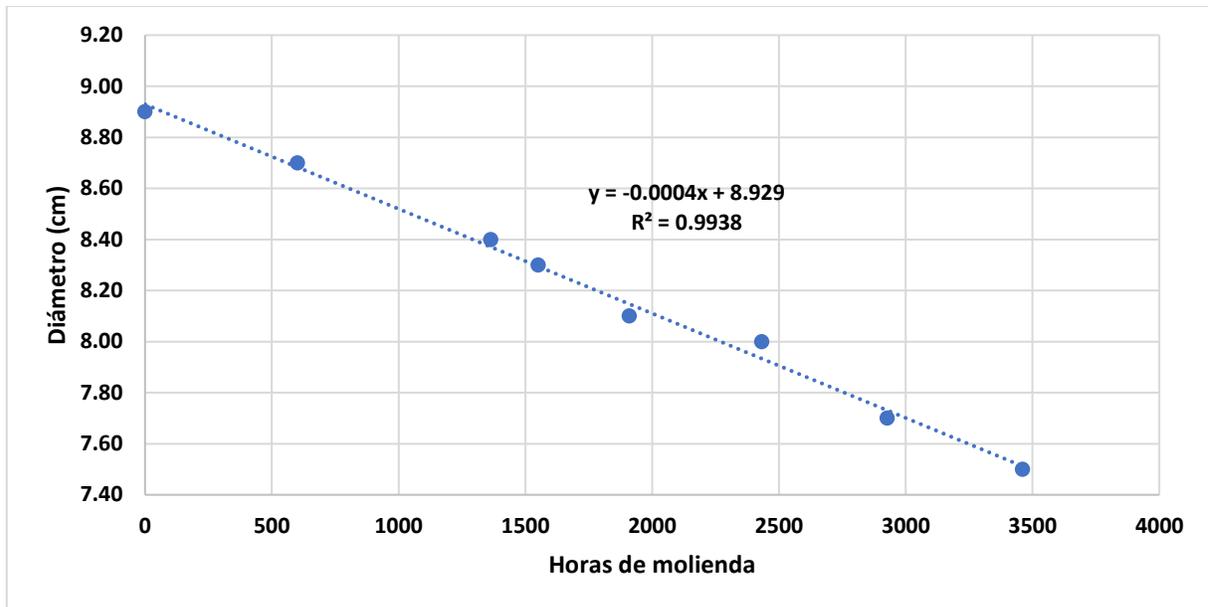


Figura 2.15: Gráfico obtenido con los datos obtenidos en la Compañía Argos.

El análisis de regresión que se hizo a la base de datos tomada de la prueba de bola marcada muestra que la mejor curva que se ajusta a los datos es una línea recta por lo que la velocidad de desgaste de las bolas es una constante (E.Rivera, 2012).

2.10.2. Análisis del desgaste de las bolas de molienda por SEM / EDX.

Los estudios realizados por Azizi A., 2015, indicaron que el tipo de mecanismo de corrosión para las bolas de acero es por picadura. Además, se observó corrosión abrasiva en la superficie de la bola de acero con alto contenido de cromo y carbono.

Las Figuras 2.16 y 2.17, corresponden a imágenes SEM de bolas de acero bajo diferentes condiciones de operación; pH: 7, porcentaje de sólidos: 35%, velocidad del molino: 75 rpm y tipo de bola: acero de baja aleación a diferentes tiempos de molienda, 90 minutos (A) y 300 minutos (B). Se puede observar en la Figura. 2.17, los surcos y rayas en la superficie de las bolas los cuales mostraron que la pérdida de masa se debió a un mecanismo de corrosión y abrasión. Las manchas más oscuras fueron atribuidas a la formación de una composición de óxido o de metal oscuro, mientras que las manchas más brillantes se atribuyeron a una composición de

metal brillante (Figura 2.16). Además, la Figura 2.17 muestra claramente una superficie irregular. Los análisis de EDX indicaron que los productos de corrosión de las bolas de acero de baja aleación correspondieron a fases de Fe, O, S, y Si.

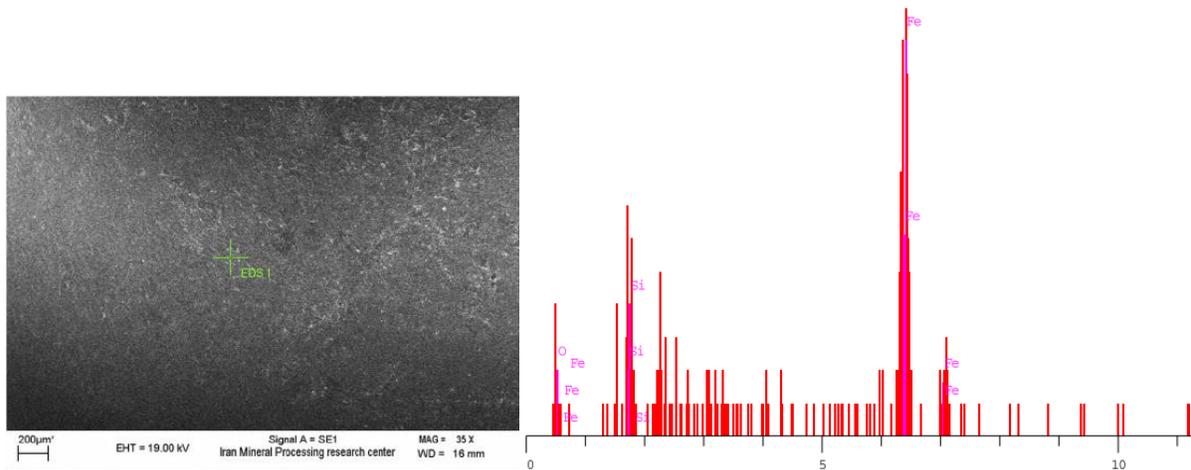


Figura 2.16: (A) SEM de la superficie de bola de baja aleación con tiempo de molienda igual a 90 minutos (Izq.) y análisis EDX (der.) en el punto señalado de la figura.

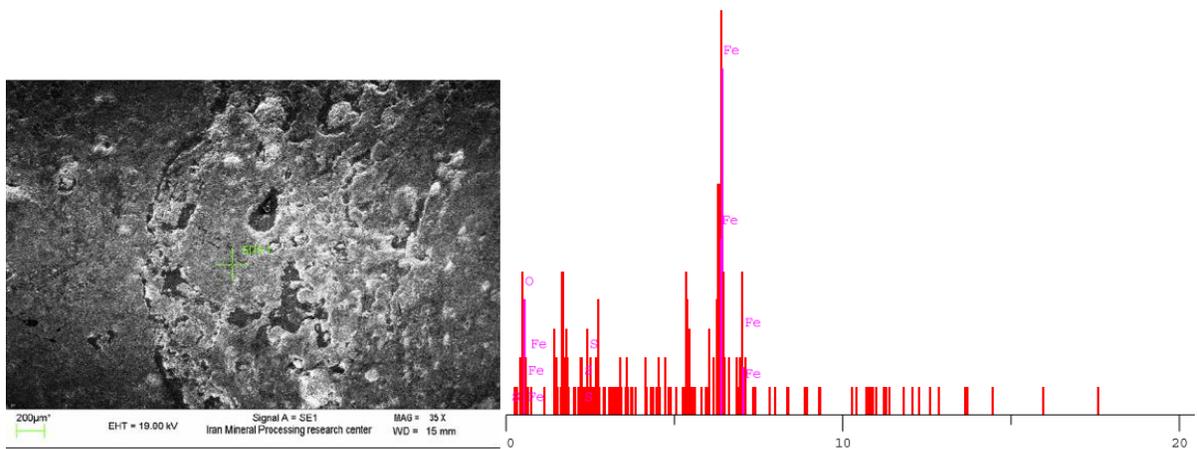


Figura 2.17: (B) SEM de la superficie de bola de baja aleación con tiempo de molienda igual a 300 minutos (Izq.) y análisis EDX (der.) en el punto señalado de la figura.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Materiales

3.1.1. Muestra de relave para molienda y sus características

El mineral que se utilizó para las pruebas de molienda corresponde a una muestra de relave de aproximadamente 60 kilogramos obtenida de una mina de la ciudad de Talca, en la cual se extraían minerales con oro, plata y cobre.

En primer lugar, se realizó un análisis de difracción de rayos X (DRX) para determinar las especies mineralógicas presentes en la muestra, los cuales se muestran en la Tabla 3.1, en la cual se puede observar un alto contenido de cuarzo.

Tabla 3.1: Resultados del análisis de Difracción de Rayos X para especies mineralógicas.

Fase Mineral	%
Cuarzo	75,2
Muscovita	3,3
Illita	4,5
Feldespatos K	3,5
Pirita	8,8
Jarosita	4,5

De la muestra obtenida del relave se clasificaron 20 kg bajo malla #70 (ASTM) para preparar el mineral requerido en las pruebas del estudio. Se obtuvo una muestra de aproximadamente 250 gramos para hacer el análisis granulométrico considerando cinco tamices: #70, #100, #200, #270 y #325 ASTM.

Cada muestra para las pruebas de molienda fue tomada respetando las técnicas de muestreo; en primer lugar, se roleó la muestra para posteriormente cuartear (Figura 3.1) hasta alcanzar la cantidad de mineral requerido para cada prueba equivalente a 145 gramos. Como se cargó

mineral cada 20 horas durante un total de 280 horas y considerando que se trabajó en forma paralela con dos molinos de las mismas dimensiones, se prepararon y rotularon 28 muestras de 145 gramos.



Figura 3.1: Muestreo del mineral mediante cono y cuarteo.

La Figura 3.2 y la Tabla 3.2 presentan los resultados obtenidos de los análisis granulométricos de la muestra clasificada. De estos resultados es posible observar que la muestra presenta un P_{80} de 133 micrones y un P_{50} de 81 micrones, de acuerdo con esto, el 80% del mineral presenta una granulometría igual o menor a 133 micrones y un 50% igual o menor 81 micrones. Lo anterior muestra que el mineral analizado presentó una granulometría fina. En la Tabla 3.3, se observa que aproximadamente un 40% del mineral clasificado queda retenido en la malla #200 y sólo un 10% en la primera malla utilizada #70.

La densidad del mineral fue calculada por picnometría. Se registraron los datos correspondientes y se calculó la densidad del mineral que correspondió a $2,7 \text{ gr/cm}^3$.

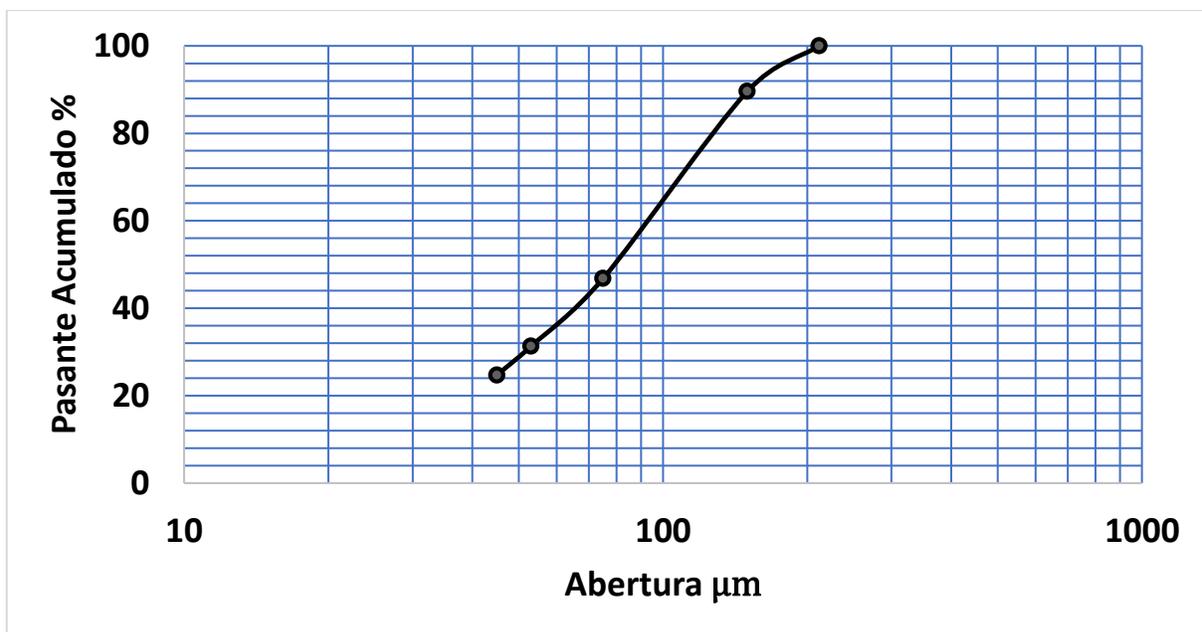


Figura 3.2: Análisis Granulométrico.

Tabla 3.2: Información obtenida del análisis granulométrico.

Malla ASTM	Abertura (um)	Retenido (g)	Retenido Acumulado (g)	Retenido parcial %	Retenido Acumulado %	Pasante acumulado %
#70	212	0	0	0	0	100
#100	150	26.40	26.40	10.41	10.41	89.59
#200	75	108.50	134.90	42.77	53.17	46.83
#270	53	39.40	174.30	15.53	68.70	31.30
#325	45	16.70	191.00	6.58	75.29	24.71
- #325		62.70	253.70	24.71	100.00	0.00

Adicionalmente, se tomó una muestra para realizar un análisis elemental con el equipo de Fluorescencia de Rayos X. Los resultados obtenidos muestran que el material clasificado se encontró principalmente constituido de sílice, azufre, hierro y aluminio (Tabla 3.3), considerando que este equipo no detecta minerales de Au y Ag en bajas concentraciones (<12 gramos/tonelada).

Tabla 3.3: Resultados del análisis con el equipo de FRX.

ID MUESTRA	ANÁLISIS FRX (%)								
	Si	Al	Fe	Mg	S	K	Ti	Mn	Cu
ALIMENTACIÓN	37,01	2,32	4,63	0,45	5,43	1,29	0,09	0,09	0,02

3.1.2. Cuerpos moledores

Se utilizaron bolas de acero forjado de aproximadamente 1 pulgada, fabricadas por la empresa Moly-Cop. Estas bolas presentan una composición variada de elementos y tratamientos térmicos que le dan las características de dureza (Tabla 3.4) necesarias para extender la vida útil de estos cuerpos moledores en un proceso de molienda. Además de aproximadamente un 95% de Fe, las bolas de acero forjado contienen principalmente carbono, cromo y manganeso (Tabla 3.5).

Tabla 3.4: Dureza de las bolas de molienda. Moly-Cop

		Dureza (Rockwell C)													
Diámetro Bola (pulg)		1	1.25	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.25	5.5	6	6.25
Superficial	Min	61	61	61	61	60	60	60	55	55	55	55	55	53	53
	Máx	65	65	65	65	65	65	65	61	61	61	61	61	61	61
Volumétrica	Min	61	61	61	61	60	60	60	55	55	55	55	55	53	53
	Máx	65	65	65	65	65	65	65	61	61	61	61	61	61	61

Tabla 3.5: Composición química de las bolas de molienda. Moly-Cop

		Composición Química (% peso)										
Diámetro Bola (pulg)	C		Mn		Si		Cr		Mo		S	P
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Máx	Máx
1	0,85	1,10	0,40	1,20	0,15	0,45	0,00	1,10	0,00	0,20	0,040	0,035

Debido a que los cuerpos moledores que se utilizaron para las pruebas de molienda del estudio ya habían sido empleados para otras pruebas, se realizó un análisis con el equipo de FRX para determinar la condición inicial real de los cuerpos moledores antes del estudio y contrastarla con la teórica entregada por el fabricante. Los resultados de este análisis se pueden ver en la Tabla 3.6, que al ser comparados con los datos de la Tabla 3.5 se aprecian algunas diferencias en la concentración de algunos elementos

Tabla 3.6: Composición química de los cuerpos moledores medida con el equipo de FRX.

		Composición Química (% peso)					
Diámetro Bola (pulg)	Fe	Mn	Cr	Si	S	Al	
1	87,39	0,93	0,07	5,81	2,35	2,87	

Posteriormente, se registró el peso inicial de las bolas usadas para agua convencional, el cual en promedio fue de 79,6 gramos. Para el caso de las bolas usadas en agua de mar, el promedio fue de 79,82 gramos. Por otro lado, el diámetro promedio de bolas de acero para ambos medios fue de 2,7 centímetros.

La carga de bolas necesarias para alcanzar un nivel de llenado del 40% fue de 33 bolas aproximadamente. Este valor se obtiene del procedimiento indicado en el capítulo 2, apartado 2.4.2.

3.1.3. Medio acuoso

El agua convencional fue obtenida directamente de la red de agua potable. El pH de este medio fue en promedio de 7,5. Para el caso del agua de mar se registró un pH de 7,67. Este medio fue obtenido en la costa de Constitución, Región del Maule, 200 metros aguas adentro. La concentración de sales, sin caracterizar su composición, fue de 53 gramos por litro.

3.2. Equipos y procedimientos

3.2.1. Equipos

Molino de Bolas

Equipo compuesto por un molino cilíndrico de acero inoxidable, el cual es accionado por un sistema de tres rodillos recubiertos de goma con velocidad controlada y una carga de bolas de acero. Este equipo puede ser utilizado tanto para molienda húmeda o seca.

Especificaciones:

- Motorreductor

- Marca: TRANSTECNO
- Modelo: CM 050 – 10 / 1
- Motor: 1/2 HP (0,37 Kw) / 220V - 380V / 50-60Hz / 3ph
- Velocidad: 1400 rpm
- Variador de frecuencia Marca: SIEMENS - Modelo SINAMIC V20
- Voltaje de Alimentación: 220V / 50Hz / 1Ph
- 3 rodillos de acero recubiertos de goma antideslizante
- Transmisión mediante poleas y correas.

El variador de frecuencia del equipo trabaja en Hz. La Tabla 3.7 indica las relaciones de Hz a RPM para operar correctamente el equipo.

Tabla 3.7: Tabla de equivalencia de Hz a RPM para el molino.

Relación Hz-RPM del equipo	
Hz	RPM
30	88
35	104
40	120
45	132
50	150
55	164
60	180

Diseño del molino

Se diseñó un molino de tamaño compacto que permitió utilizar sólo dos de los tres rodillos del sistema que acciona el molino, ubicando uno delante del otro.

Los molinos cilíndricos tienen un diámetro de 14,8 centímetros y un largo de 10 centímetros en su parte interior, logrando un volumen total de 1.620 cm³.

La relación entre el largo y el diámetro de un molino de bolas (L/D) va desde 0,5 a 3,5. En este caso, considerando las dimensiones de los molinos diseñados se logró una relación L/D de 0,7.

En la parte exterior, el molino fue construido en acero al carbono, generando dos anillos de agarre, uno en la parte superior y otro en la parte inferior. Para evitar la filtración de agua, en la parte superior se usó una goma de empaquetadura de 0,6 centímetros de espesor la cual era prensada con el sistema de cierre del molino. Debido a que se trabajó con una pulpa con un porcentaje bajo en sólidos, todas las soldaduras y juntas del molino debieron quedar perfectamente soldadas para evitar cualquier tipo de filtración de agua.

La velocidad de operación del molino se calculó a partir de la velocidad crítica (ecuación 2.2) considerando un diámetro interior de 0,148 metros y una velocidad de operación de un 80% de la velocidad crítica.

$$\text{Velocidad de operación} = 0.8 \times N_c \quad (3.1)$$

De acuerdo con estas relaciones matemáticas se trabajó a 88 RPM o 30 Hz (Tabla 3.7)

Balanza de precisión

La balanza de precisión fue utilizada para medir el peso de los cuerpos moledores en su estado inicial y posteriormente al término de cada proceso de molienda hasta completar 280 horas.

Se utilizó una balanza semi-micro analítica con calibración motorizada automática marca Boeco la cual tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Modelo: BXX 22
- Carga máxima: 82/220 g
- Carga mínima: 0.001 g
- Legibilidad: 0.00001/0.0001 g
- Rango de tara: -220 g
- Tamaño del platillo: 80 mm de diámetro.

Filtro de presión

El filtro de presión EDEMET, de acero inoxidable fue utilizado para reducir la humedad del producto de molienda después de cada prueba. La utilización de este filtro a presión permitió recuperar y tomar muestras de agua convencional y de mar para análisis posteriores a la investigación. Sus Características principales:

- Manómetro 0-260 psi
- Llave de descompresión rápida
- Válvula de conexión rápida

Horno de secado

La estufa de secado se utilizó en el proceso posterior al filtrado, para terminar de extraer la humedad de la pulpa proveniente de molienda y obtener un producto 100% seco para ser almacenado. Estas son algunas especificaciones del horno utilizado:

- Modelo: BellHorSecAireForzV-225
- Capacidad: 225L
- Rango de temperatura: RT+10-250/300°C.
- Consumo de energía: 2100W
- Tamaño interno (A*A*P) mm: 500*600*750
- Peso bruto (Kg): 110

Microscopio óptico trinocular de luz polarizada

Se utilizó este equipo para el análisis metalográfico a los cuerpos molidores en su estado inicial y luego de finalizadas las 280 horas de molienda. Principalmente, se buscó observar las superficies de los cuerpos para identificar algún tipo de desgaste. Este equipo está preparado para observar imágenes bidimensionales, por lo tanto, es necesario preparar la muestra en un portaobjetos y un cubreobjetos para poder observarla correctamente. Los objetivos de los microscopios binoculares suelen aumentar entre 4x y 100x mientras que el ocular tiene

habitualmente un aumento de 10x o 20x. Por lo tanto, el aumento total de los microscopios binoculares suele estar comprendido entre 40x y 1500x.

Analizador de Fluorescencia de Rayos X

El equipo de FRX Niton XL3t portátil marca Thermo, fue utilizado en varias etapas de la investigación. Por ejemplo, para determinar la composición química del mineral en su estado inicial, para analizar la concentración de Fe y otros elementos después de molienda y para analizar las sales del agua de mar. Este equipo de FRX tiene las siguientes características:

- Alta sensibilidad y precisión de la medición.
- Límites de detección más bajos para elementos Z más altos, con elementos adicionales Mg, Al, Si y P mediante purga de helio.
- Cámara CCD opcional para identificación visual y para la grabación de imágenes.
- Se puede elegir un micropunto de 3 mm para localizar áreas de interés en una muestra.
- El tubo de rayos X de 50 kV proporciona aproximadamente dos veces el flujo de rayos X de un tubo de rayos X de 40 kV.
- El adaptador de superficie caliente Hotfoot permite realizar análisis en refinerías petroquímicas con hasta 450 °C.

Ro-Tap y serie de tamices

Se utilizó un agitador de tamices en la etapa inicial para determinar la granulometría del mineral y realizar el análisis correspondiente. El agitador de tamices marca Tyler, modelo RX-29-10, acepta un máximo de 8 tamices. Para el estudio se utilizaron 5 tamices: #70, #100, #200, #270 y #325 ASTM.

Este equipo cuenta con un reloj digital con una precisión de 0.1 segundos. Genera movimientos rotatorios y trepidatorios con 279 RPM y 150 golpes por minuto.

Lupa estereoscópica

Se utilizó un estereomicroscopio Leica EZ4E, para tomar imágenes de los cuerpos molidores en su estado inicial y final para evaluar diferencias superficiales y disminución de las perforaciones realizadas a los cuerpos molidores para su seguimiento. El equipo tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Zoom 4.4: 1 con cámara digital incorporada de 5MP HD y rango de zoom 8x-35x
- Oculares de 10x / 20 mm de alto y no extraíbles
- Distancia de trabajo de 100 mm

3.2.2. Procedimientos

3.2.2.1. Pruebas de molienda

Una vez realizada la etapa de muestreo y asegurándose que el mineral era homogéneo, se procedió a cargar el molino con la cantidad de mineral requerido para tener una concentración de sólidos cercana al 36%. Para ello se determinó la densidad de la pulpa y se calculó la cantidad de mineral y de agua necesaria para alcanzar el volumen de llenado del molino requerido para las pruebas. Este proceso se realizó de igual manera para cada ensayo, ya que la alimentación del molino no es continua. Se realizó recambio de mineral y el medio acuoso cada 20 horas.

Por lo tanto, considerando una concentración de sólidos de 36%, se obtuvo la densidad de la pulpa de la ecuación 3.2, en donde C_s es la concentración de sólidos, ρ_m densidad del mineral y ρ_{H_2O} es la densidad del medio.

$$\rho_{pulpa} = \frac{1}{\left(\frac{C_s}{\rho_m \left(\frac{gr}{cm^3}\right)}\right) + \left(\frac{1 - C_s}{\rho_{H_2O} \left(\frac{gr}{cm^3}\right)}\right)} \quad (3.2)$$

Se obtuvo una densidad de la pulpa de $1,3 \text{ gr/cm}^3$ y el pH de la pulpa fue medido con un pH-metro el cual arrojó un valor de 7,8.

Conociendo la concentración de sólidos, la densidad de la pulpa y el volumen disponible para alcanzar el factor de llenado del 40% del molino, se calculó la cantidad de mineral requerido para cada prueba usando la fórmula de %P/P y se determinó la cantidad de 145 gramos.

De la misma forma que se calcularon los gramos de mineral se calculan los gramos de agua; como el 36% del peso lo ocupa el mineral, el 64% será ocupado por el agua. De esta forma se necesitaron aproximadamente 260 gramos de agua. Como se trabajó con dos medios diferentes, se consideraron 260 gramos de agua de la red y 260 gramos de agua de mar para cada prueba.

Cabe destacar, que inicialmente el estudio se realizó en dos molinos de diferentes dimensiones; el que fue construido específicamente para las pruebas y otro con un volumen notablemente superior (22,7 cm de largo por 17,5 cm de diámetro, en el Anexo A se detallan las características), mientras se terminaba la construcción del segundo molino. En estas condiciones se trabajó durante las primeras 100 horas. Por lo tanto, a partir de las mediciones realizadas a las 120 horas, las condiciones de operación fueron las mismas.

El control de la operación de la molienda se realizó periódicamente, verificando la correcta frecuencia del molino, temperatura del motor y control de alguna filtración de agua por mal sellado del molino. Una vez terminado el tiempo de molienda se procedió a descargar el molino, separar las bolas del mineral y repetir el proceso. Posterior a la toma de datos, se filtró el producto de la molienda, se tomó una muestra de agua y finalmente se secó el mineral a 105°C durante 12 horas para almacenarlo y tenerlo como respaldo para análisis posteriores.

Finalizadas las primeras 40 horas de prueba y hasta completar las 280 horas, se realizó un análisis químico de Fluorescencia de Rayos X (FRX) del producto de molienda cada 40 horas, para observar si existía una variación en la concentración de Fe, Cr y Mn en el mineral proveniente del proceso debido al desgaste de los cuerpos moledores.

3.2.2.2. *Control a cuerpos moledores*

Se seleccionó un total de 5 bolas por molino para realizar el seguimiento, las cuales fueron marcadas con líneas que permitieron identificarlas fácilmente a la hora de realizar las mediciones; la bola número 1 fue marcada con una línea, la bola número dos con dos líneas, y así hasta la número 5, tal como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Imágenes tomadas con lupa estereoscópica a las bolas marcadas inicialmente.

Las bolas se lavaron, se secaron y pesaron una a una para obtener el peso inicial. Este procedimiento se llevó a cabo sólo con las bolas marcadas. Se registraron estos datos iniciales para poder comparar posteriormente con los datos que se fueron midiendo; en primer lugar, se registró el peso inicial de las bolas que se utilizaron para cada medio, posteriormente el diámetro y finalmente se registraron algunas fotografías con una lupa estereoscópica para contrastar su estado al finalizar las pruebas.

Conociendo la carga de bolas, se calculó el error muestral considerando el número de bolas que se tomó para realizar el seguimiento y se obtuvo un error 41.2% de la siguiente relación donde n es la muestra y N es la población total.

$$\text{Error muestral} = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) - \left(\frac{1}{N}\right)}, \quad (3.3)$$

Una vez finalizado cada ensayo, el molino fue descargado, separando la carga de mineral de las bolas. Una vez lavadas y secadas las bolas marcadas fueron pesadas una a una y sometidas a los

análisis de desgaste ya sea por pérdida de masa, diámetro y ayudado además por la toma de imágenes con la lupa estereoscópica.

Se llevó un registro de datos cada 40 horas hasta completar 280 horas de operación, de tal forma de registrar una cantidad de datos que permita generar una gráfica que demuestre la tendencia del desgaste de bolas de molienda a través del tiempo. Para evitar el contacto con el aire, durante el tiempo que implicó lavar y preparar todas las bolas para ser pesadas, se mantuvo las bolas marcadas en un recipiente con agua; de esta forma se evitó la oxidación generada por el aire.

Para evaluar alguna evidencia o rastro de corrosión que se haya presentado ya sea en la superficie o interior de los cuerpos molidores durante el periodo de pruebas, se tomaron tres muestras de cuerpos molidores y se realizó un corte en la mitad de cada bola de acero, se pulió y se registraron imágenes amplificadas con un microscopio considerando su estado inicial, 280 horas en agua convencional y 280 en agua de mar, observando y prestando una mayor atención a los bordes de los cuerpos molidores puesto que estos serían los puntos críticos.

4. RESULTADOS

4.1. Control de peso y diámetro de los cuerpos molidores

La Tabla 4.1 presenta los resultados obtenidos en agua convencional de las mediciones de masa realizadas a las 5 bolas de acero seleccionadas previamente para el control con su respectivo promedio. Cabe destacar que la pérdida de masa promedio cada 40 horas es aproximadamente 0,3 gramos, observándose a las 120 horas una leve disminución del desgaste.

Tabla 4.1: Registro de la masa de los cuerpos molidores utilizados en agua convencional.

Bolas utilizadas en agua convencional								
N° Bola	Masa inicial (g)	40 H (g)	80 H (g)	120 H (g)	160 H (g)	200 H (g)	240 H (g)	280 H (g)
1	80,8061	80,4917	80,1743	79,8869	79,5713	79,2582	78,9443	78,6256
2	80,1634	79,8578	79,5503	79,2762	78,9762	78,6725	78,3744	78,0708
3	81,7659	81,4458	81,1213	80,8317	80,5117	80,1881	79,8619	79,5453
4	79,782	79,4841	79,1789	78,9069	78,6074	78,3065	78,0085	77,7069
5	80,2766	79,9688	79,6524	79,3662	79,0545	78,7389	78,4239	78,1089
Promedio	80,5588	80,2496	79,9354	79,6536	79,3442	79,0328	78,7226	78,4115
Pérdida parcial promedio		0,3092	0,3142	0,2819	0,3094	0,3114	0,3102	0,3111

La Tabla 4.2 presenta los resultados obtenidos en agua de mar de las mediciones de masa realizadas a las 5 bolas de acero seleccionadas previamente para el control con su respectivo promedio. Cabe destacar en este caso, a diferencia del desgaste en agua convencional, el desgaste durante las primeras 120 horas es levemente menor. Sin embargo, el desgaste de los cuerpos molidores a través del tiempo es similar para cada una de las bolas y para cada caso, agua convencional y de mar. La única diferencia que se evidencia es la desigualdad del peso inicial pero que para este caso no es relevante, puesto que lo que se evalúa es la diferencia de la masa perdida.

Tabla 4.2: Registro de la masa de los cuerpos molidores utilizados en agua de mar.

Bolas utilizadas en agua de mar								
N° Bola	Masa inicial (g)	40 H (g)	80 H (g)	120 H (g)	160 H (g)	200 H (g)	240 H (g)	280 H (g)
1	81,4883	81,1986	80,9024	80,6283	80,3171	80,0074	79,6887	79,371
2	80,3279	80,0522	79,7557	79,4823	79,1787	78,8686	78,5618	78,2509
3	81,1072	80,8383	80,5379	80,2688	79,9592	79,6473	79,3376	79,0273
4	80,5177	80,2201	79,9145	79,6411	79,3314	79,0178	78,7092	78,3952
5	79,9452	79,6758	79,3838	79,1119	78,806	78,5016	78,1917	77,8837
promedio	80,6773	80,3970	80,0989	79,8265	79,5185	79,2085	78,8978	78,5856
Pérdida parcial promedio		0,2803	0,2981	0,2724	0,3080	0,3099	0,3107	0,3122

Se observa de las Tablas 4.1 y 4.2 que a medida que avanzan las horas de prueba los cuerpos molidores pierden masa en forma leve pero constante.

En la Figura 4.1 se observa comparativamente el desgaste parcial de los cuerpos molidores a través del tiempo durante 280 horas. Se observan diferencias durante las primeras 120 horas, a partir de ese punto la tendencia de las líneas se asemeja y se comienza a estabilizar. La diferencia de desgaste entre el punto inicial y las 120 horas se debe a la desigualdad de condiciones de operación, puesto que para el medio agua convencional se utilizó un molino de mayor tamaño mientras se construía el segundo molino diseñado específicamente para estas pruebas. A partir del punto 120 horas en adelante las condiciones de operación son idénticas.

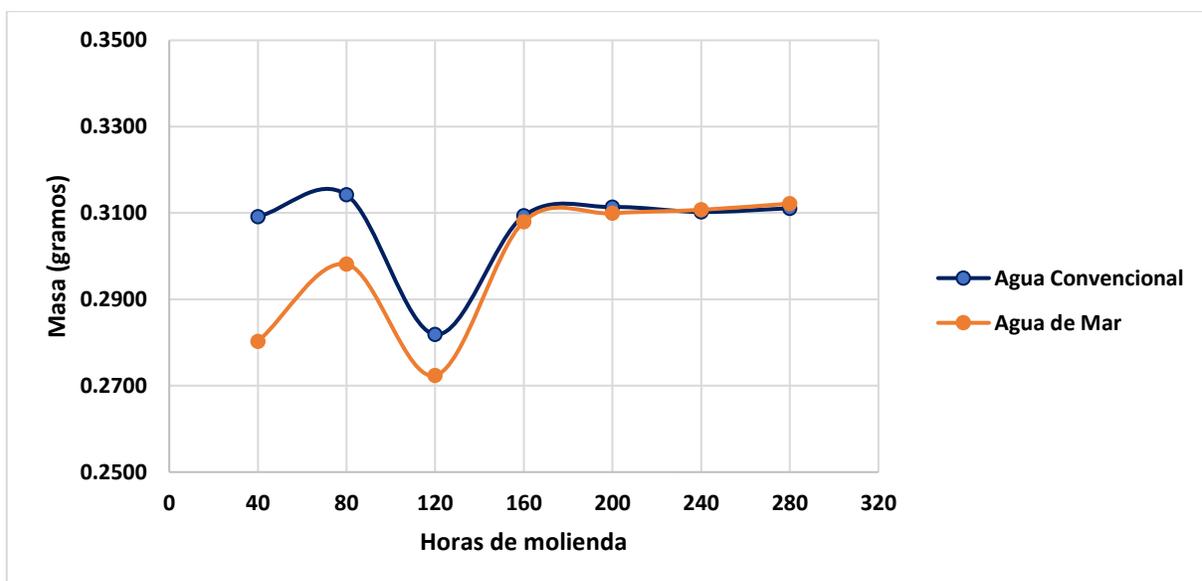


Figura 4.1: Gráfica comparativa de la tendencia de desgaste parcial de los cuerpos molidores.

Se calculó la pérdida de masa de los cuerpos molidores en forma acumulada para determinar la pérdida de masa total al cabo de 280 horas de operación para cada cuerpo molidor, pero considerando desde las 120 horas en adelante debido a que desde ese punto existe una igualdad de condiciones para los medios estudiados. Las Tablas 4.3 y 4.4 presentan los resultados promedios de la pérdida en peso acumulado de los cuerpos molidores en agua convencional y agua de mar respectivamente, durante las últimas 160 horas de operación

Tabla 4.3: Registro de la pérdida de peso acumulado de los cuerpos molidores en agua convencional.

Pérdida en peso en agua convencional (acumulado)				
N° Bola	160 H (g)	200 H (g)	240 H (g)	280 H (g)
1	0,3156	0,6287	0,9426	1,2613
2	0,3	0,6037	0,9018	1,2054
3	0,32	0,6436	0,9698	1,2864
4	0,2995	0,6004	0,8984	1,2
5	0,3117	0,6273	0,9423	1,2573
Promedio	0,3094	0,6207	0,9310	1,2421

Tabla 4.4: Registro de la pérdida de peso acumulado de los cuerpos molidores en agua de mar.

Pérdida en peso en agua de mar (acumulado)				
N° Bola	160 H (g)	200 H (g)	240 H (g)	280 H (g)
1	0,3112	0,6209	0,9396	1,2573
2	0,3036	0,6137	0,9205	1,2314
3	0,3096	0,6215	0,9312	1,2415
4	0,3097	0,6233	0,9319	1,2459
5	0,3059	0,6103	0,9202	1,2282
Promedio	0,3080	0,6179	0,9287	1,2409

En la Figura 4.2 se muestra la gráfica que ilustra los datos de las tablas anteriores, considerando sólo las últimas 160 horas de operación. Esta gráfica (Figura 4.2) muestra la pérdida de masa promedio de los cuerpos molidores en ambos casos desde que se comienza a medir (en iguales condiciones) hasta el término de las pruebas. En ambos casos se alcanza una pérdida total de aproximadamente 1,24 gramos por cada cuerpo molidor. Las líneas del gráfico están superpuestas, debido a la similitud de los datos obtenidos de las pruebas. En el anexo B se pueden observar las gráficas por separado, para cada medio. Se observa en ambos casos una tendencia claramente lineal, lo cual se respalda con la ecuación de la recta entregada para la

pérdida de masa en agua convencional y en agua de mar; $y=0,0078x$, $y=0,0077x$ respectivamente, siendo “y” el desgaste en gramos y “x” la cantidad de horas de molienda. Entonces, a partir de lo anterior, existe una leve superioridad del desgaste de los cuerpos molidores en agua convencional equivalente a 0,0001 gramos por hora de molienda. Lo anterior, se relaciona con lo citado en la revisión bibliográfica; Concha & Menacho, 1986; La ley de desgaste que gobiernan las bolas en el molino corresponde a una cinética de desgaste de orden cero o una velocidad de desgaste constante.

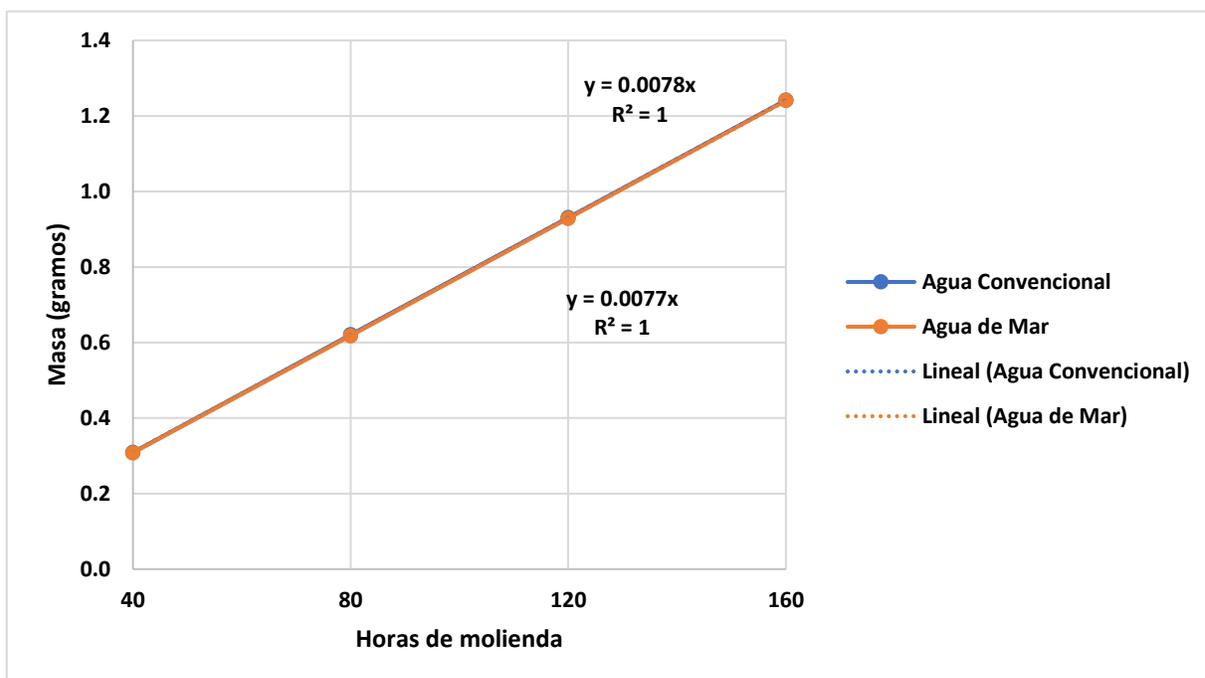


Figura 4.2: Gráfica del desgaste a partir de la pérdida de masa acumulada para ambos medios.

De acuerdo con las ecuaciones de la recta, si se realiza un cálculo simple del desgaste de los cuerpos molidores para este estudio, considerando que para los dos medios se utilizaron 33 bolas de acero, el desgaste total en agua convencional sería de 0,2574 gramos por hora y 0,2541 gramos por hora para el caso del agua de mar. De acuerdo con este análisis, existe una diferencia en el desgaste de los cuerpos molidores cercana al 1%, siendo mayor el desgaste en agua convencional.

Con los datos obtenidos de las pruebas, se realizó un análisis estadístico para determinar si la diferencia del desgaste de los cuerpos molidores generada por el medio es significativa o no.

Para ello se realizó un test de Diferencias de Medias utilizando una distribución de probabilidades T-Student con un 95% de confianza y 8 grados de libertad.

El procedimiento fue el siguiente:

- n: número de muestras,
- \bar{X}_n : promedio de los datos con agua convencional,
- \bar{Y}_n : promedio de los datos con agua de mar,
- S_x : desviación estándar muestral de los datos con agua convencional,
- S_y : desviación estándar muestral de los datos con agua de mar.

Se calculó el estadístico pivote, el cual fue comparado con el valor entregado por tabla T-Student al 95% de confianza y 8 grados de libertad (n_1+n_2-2).

$$T(\text{pivote}) = \frac{|\bar{X}_n - \bar{Y}_n|}{\sqrt{\left(\frac{S_x^2}{n}\right) + \left(\frac{S_y^2}{n}\right)}} \quad (4.1)$$

Se utilizaron los valores de las tablas de pérdidas acumuladas para el estudio estadístico a partir de las últimas 160 horas.

Tabla 4.5: Resumen de datos utilizados para el análisis.

Bolas utilizadas en agua convencional				
N° Bola	160 H (g)	200 H (g)	240 H (g)	280 H (g)
Promedio	0.31	0.62	0.93	1.24
Des.vest	0.01	0.02	0.03	0.04
n	5	5	5	5
Bolas utilizadas en agua de mar				
N° Bola	160 H (g)	200 H (g)	240 H (g)	280 H (g)
Promedio	0.31	0.62	0.93	1.24
Desv.est	0.00	0.01	0.01	0.01
n	5	5	5	5
Pivote	0.3	0.3	0.2	0.1
t(5+5-2)	2.75	2.75	2.75	2.75
Hay diferencia	No	No	No	No

Si el pivote es mayor a t con 8 grados de libertad (valor obtenido de tabla T-Student), se puede decir con un 95% de confianza, que la diferencia en el desgaste de los medios es significativa, independiente de si es positiva o negativa.

Este método, considera el promedio de los desgastes y la desviación estándar de estos, así como también la muestra que fue tomada del total de 33 bolas de acero, que para ambos casos fue n=5.

Se aprecia además de la Tabla 4.5 que, durante el período de evaluación, en ningún momento la diferencia del desgaste es significativa de acuerdo con los parámetros mencionados anteriormente, esta aseveración se puede comprobar de mejor forma en el gráfico de la Figura 4.1.

La Tabla 4.5 corresponde al registro de la variación del diámetro de los cuerpos molidores en ambos medios. Cada valor corresponde al promedio del diámetro medido en tres puntos a cada una de las bolas marcadas. Se registró esta información cada 40 horas y se observa en la tabla que las variaciones entre el estado inicial y final del diámetro es mínima, por lo tanto, no se consideraron estos datos para realizar el análisis.

Tabla 4.6: Variación del diámetro respecto a las horas de operación.

Variación del diámetro de Bolas		
Hora	Agua convencional	Agua de Mar
-	2,71	2,70
40	2,70	2,70
80	2,70	2,70
160	2,70	2,70
240	2,69	2,70
280	2,69	2,69

4.2. Análisis de Fe, Cr y Mn en el producto de molienda

Las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 presentan los resultados obtenidos de los análisis de FRX específicamente de hierro, cromo y manganeso realizados en el producto de molienda cada 40 horas en forma acumulada.

La Figura 4.3, deja en evidencia que la concentración de Fe aumenta considerablemente respecto a su estado inicial y se mantiene oscilando entre los valores 8 y 9% (Gráfico 1, Anexo B) con un promedio de 8,9% durante las siguientes horas, lo que es concordante con los resultados obtenidos de la pérdida de masa que también fueron constantes. Si bien la concentración de Fe es siempre mayor en el producto con agua convencional, estos valores son muy similares a los obtenidos en agua de mar, lo que se puede apreciar sobre todo a las 240 horas de operación donde las concentraciones acumuladas se igualan y posteriormente sigue la tendencia de una mayor presencia de Fe en el producto con agua convencional.

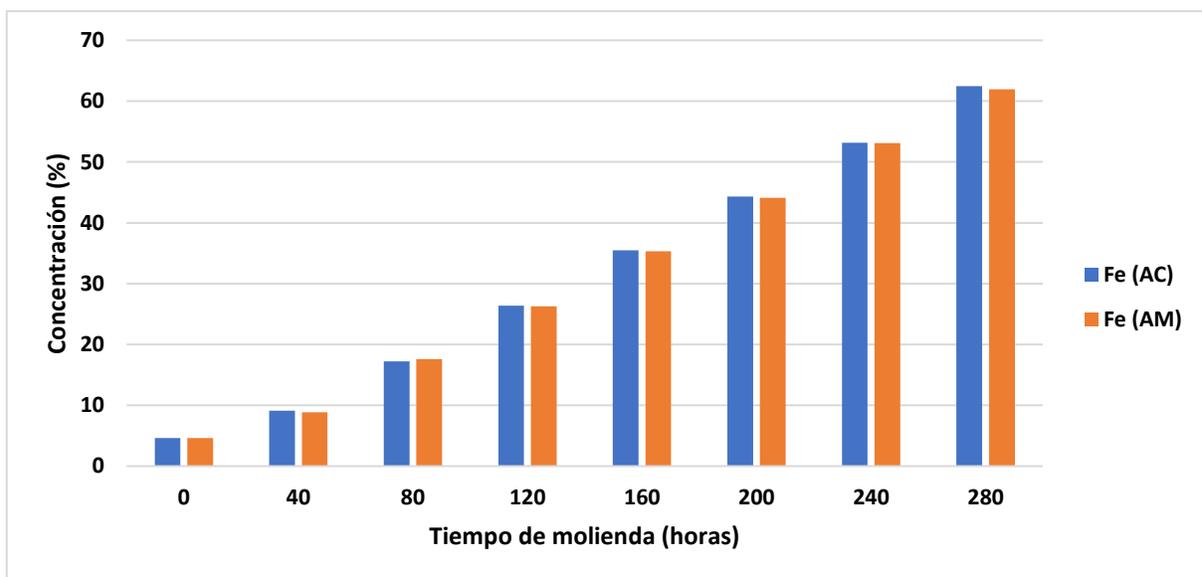


Figura 4.3: Concentración de Fe acumulado durante 280 horas de operación.

En el caso del Cr, (Figura 4.4) se observa una tendencia similar a la obtenida con el Fe siendo destacable que no hay presencia de Cr en la muestra de relave y conforme pasa el tiempo éste va en incremento en forma proporcional. Lo anterior puede deberse al desgaste de los cuerpos molidores dado que de acuerdo con su caracterización estas bolas de acero tienen una baja concentración de cromo. Se observa además, que la presencia de Cr en forma acumulada al cabo de las 280 horas de operación es mayor en el producto con agua convencional, similar a lo que ocurrió con el Fe.

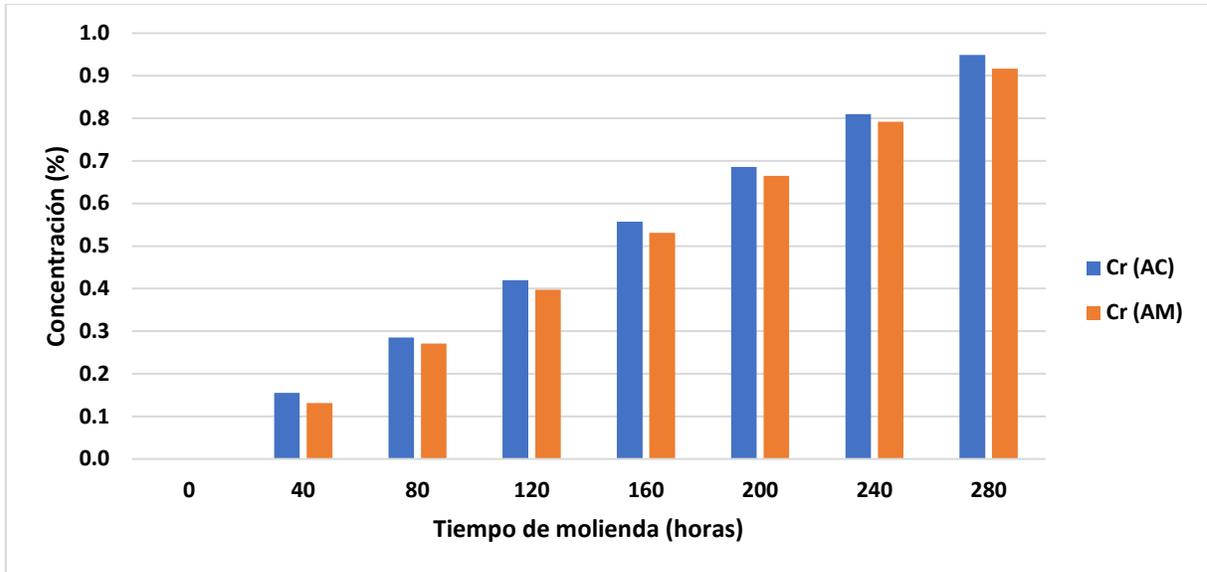


Figura 4.4: Concentración de Cr acumulado durante 280 horas de operación.

En el caso del Mn (Figura 4.5), se observa un leve incremento en la concentración respecto al estado inicial. Al cabo de 240 horas de operación se igualan las concentraciones, y posteriormente esta aumenta en el producto con agua convencional, situación que había sido contraria antes de las 240 horas de operación en donde la concentración de Mn siempre fue mayor en el producto con agua de mar. Por lo tanto, se podría decir que el Mn siguió una tendencia distinta respecto a los otros dos elementos, sin embargo, estos porcentajes son muy cercanos entre sí y no pueden ser concluyentes; esto podría deberse también a la diferencia que existió en las condiciones de operación durante las primeras 120 horas, debido a que se trabajó con molinos diferentes en cuanto a tamaño; lo que influye en la velocidad de operación, y en cuanto a composición química del acero del revestimiento, lo que se traduce finalmente en una mayor o menor concentración de elementos en el producto de molienda.

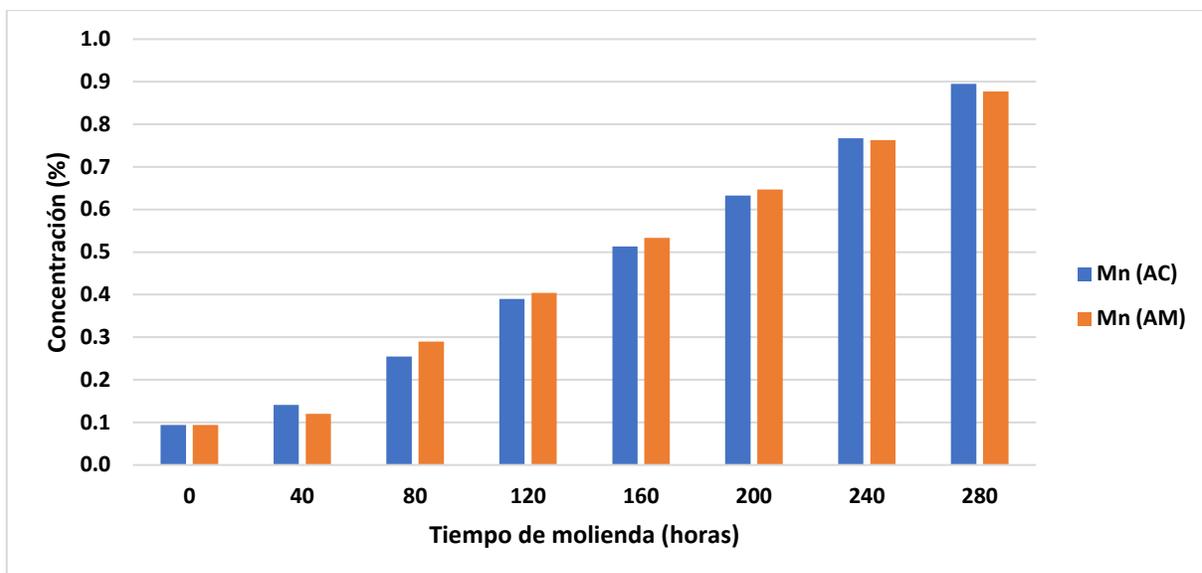


Figura 4.5: Concentración de Mn acumulado durante 280 horas de operación.

El dato más llamativo corresponde al Fe, el cual aumenta su concentración aproximadamente un 90% después de cada prueba, que se asocia al Fe proveniente de los residuos de los cuerpos molidores debido a su desgaste durante el proceso de molienda y del desgaste generado a las paredes o revestimiento interior del molino. Este aumento de la concentración de Fe en el mineral después de molienda que se pudo medir, es razonable y ocurre día a día en las plantas de procesamiento. Es por esto que constantemente se busca reducir la contaminación del mineral debido a partículas de Fe (óxido ferroso) desprendidas de los cuerpos molidores que dificultan la recuperación del mineral de interés. Se han realizado estudios para aumentar la dureza de las bolas de acero agregando un mayor contenido de Cr. El menor desgaste de los cuerpos molidores se debe a la mayor resistencia a la corrosión, abrasión y dureza que otorga la aleación cromo-hierro (Minería Chilena, 2014).

4.2.1. Balance de masas

Inicialmente, se tienen 145 gramos de mineral con sus respectivas concentraciones de cada elemento (Fe, Cr y Mn) medidas con el equipo de FRX (Tabla 4.7) y se calculó el equivalente en gramos de cada elemento llegando a los resultados que se muestran en la Figura 4.6. Se consideraron estos elementos para la evaluación debido a que eran comunes, en el caso del Fe

y Mn, en la muestra de mineral y en la composición de los cuerpos molidores. Se observa, tanto en la Tabla 4.7 como en la Figura 4.6 que el Fe se presenta en mayor abundancia.

Tabla 4.7: Concentraciones de Fe, Cr y Mn en las muestras.

Muestra	Elemento	Concentración (%)
Alimentación	Fe	4,6
	Cr	0
	Mn	0,1
Producto	Fe	8,9
	Cr	0,1
	Mn	0,1

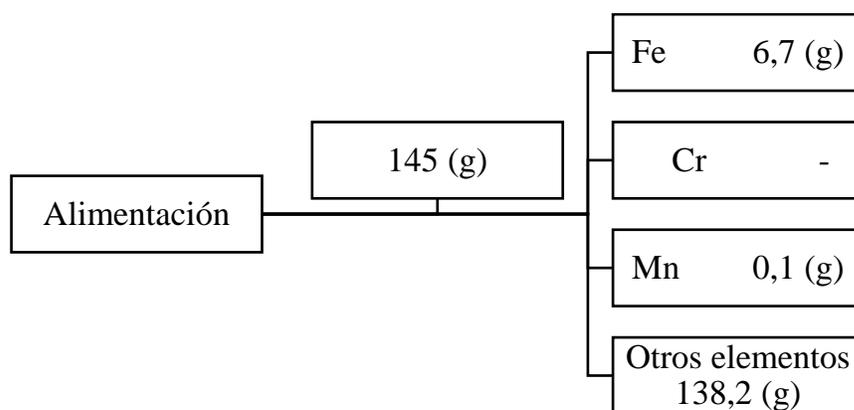


Figura 4.6: Masa correspondiente a cada elemento en la alimentación.

De acuerdo con el registro de pérdida de masa, se considera que las 33 bolas de acero en 20 horas pierden en total aproximadamente 5 gramos, por lo tanto, estos se deben sumar al peso del mineral de alimentación. A partir de esta información se calculó el equivalente en gramos para cada elemento de acuerdo con su concentración después del proceso de molienda. Ver Figura 4.7.

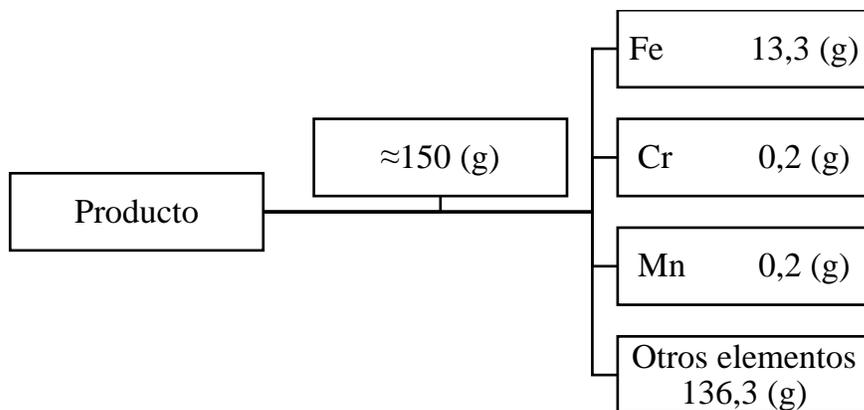


Figura 4.7: Masa correspondiente a cada elemento después de 20 horas de molienda

Si se realiza un balance de masas para ver si existe un equilibrio basado en el aumento de la concentración del elemento que se presenta en mayor concentración (Fe), se determinó lo siguiente:

De acuerdo con la composición química de los cuerpos moledores, aproximadamente un 96% del total corresponde a Fe. Por lo tanto, de los 5 gramos que se desgastan los cuerpos moledores en 20 horas de molienda 4,8 gramos corresponden a Fe. Si se observa la Figura 4.7, después de la molienda existen 13,3 gramos de Fe, 6,6 gramos más que en la alimentación. Por lo tanto, existe una diferencia de 1,8 gramos que exceden el valor de Fe que teóricamente debería existir en el producto de molienda.

Esta diferencia, podría ser justificada por el aporte de Fe y otros elementos que provienen de las paredes o revestimiento del molino, que justificarían la presencia de una mayor concentración de elementos de la que teóricamente debería existir. Además, se debe considerar que el balance se realizó sólo con 3 elementos y no con la totalidad que está constituida una bola de acero.

4.3. Análisis metalográfico de las bolas de acero

En la Figura 4.6 se presentan las imágenes metalográficas de los cuerpos moledores en su estado inicial a 100x y 500x de aumentos. A 100x de aumento se observa que la superficie no presenta

ningún tipo de fisura o picado y a 500x de aumento es posible observar que las bolas de acero poseen una microestructura martensítica esperable en los materiales de aceros inoxidable templados. Durante el tratamiento térmico, específicamente en el temple, es muy importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo. Los aceros martensíticos presentan resistencia a la corrosión por agua y ciertos químicos. A medida que aumenta el contenido de carbono esta disminuye, en tanto que se eleva con el contenido de cromo. El níquel también incrementa la resistencia a la corrosión. Todos los aceros inoxidables martensíticos son templables y debido a la alta templabilidad por el alto contenido de cromo pueden, generalmente, ser enfriados al aire; algunos otros lo son en aceite y agua. Además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica para poder obtener de esta forma la Martensita (Rodríguez & Muñoz, 2016). Si la temperatura de temple es correcta, las agujas muy finas de martensita exigen 1000x de aumento o más para su interpretación (Garavito, 2008).

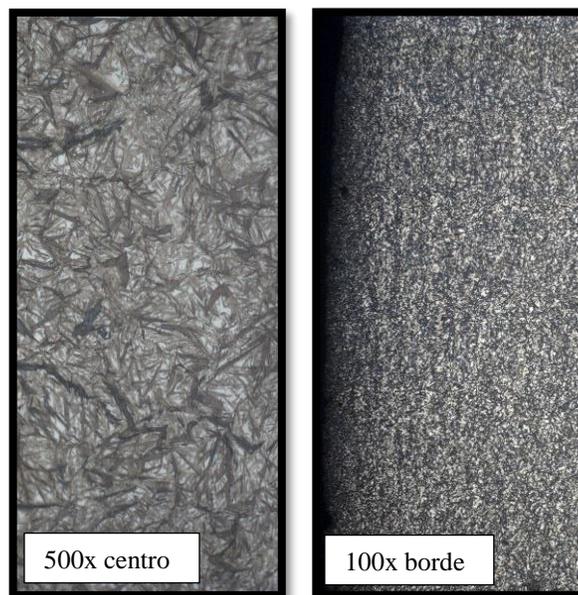


Figura 4.8: Imágenes microscópicas de los cuerpos molidores en su estado inicial.

Como se mencionó en capítulo 2, los cuerpos molidores presentan una microestructura martensítica. La martensita es la fase que presenta mayor dureza en los aceros, tiene forma de agujas y placas. El tamaño de las agujas de la martensita va a controlar propiedades como la

fluencia y la tenacidad. La martensita tiene una gran dureza, pero una tenacidad bastante baja. Es por esto que, si bien se requiere martensita para otorgarle mayor dureza a los aceros, esta debe estar en un porcentaje adecuado para que el acero no pierda tenacidad y no se fracture frente a esfuerzos (Va Larre, 2008).

La Figura 4.7 presenta imágenes comparativas de las metalografías de los cuerpos molidores luego de pasado 280 horas de operación en presencia de ambos medios; agua convencional y agua de mar tomadas a 100x de aumento. De acuerdo con la Figura 4.6 (estado inicial) y la Figura 4.7 (estado final), comparativamente las imágenes muestran superficies sin ningún tipo de desgaste.

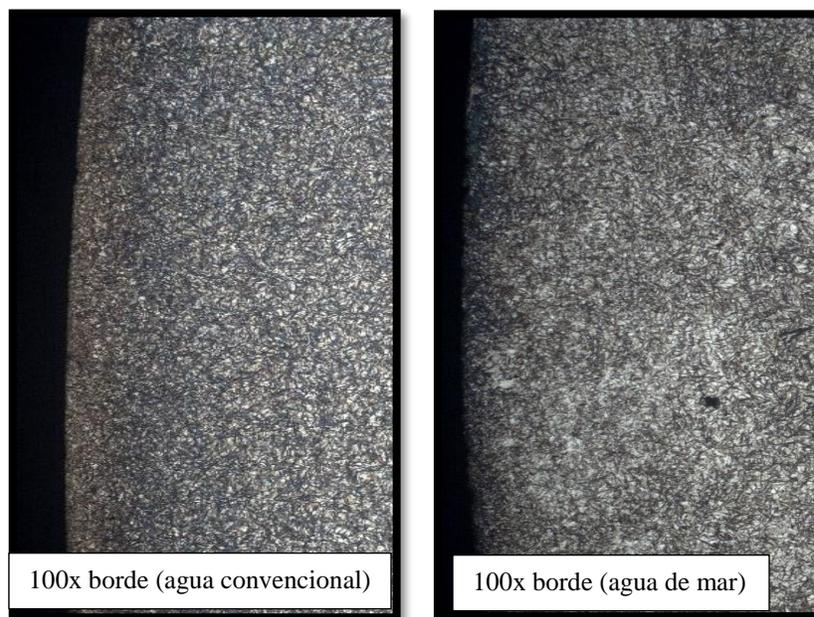


Figura 4.9: Imágenes microscópicas después de 280 horas de molienda en cada medio.

Una vez concurridas 280 horas de pruebas, para el caso de los cuerpos molidores utilizados para la molienda en agua convencional, no se observa en el borde de la bola cortada la presencia de algún daño o modificación de la estructura que se haya producido por efecto del desgaste, así como tampoco se observan canales hacia el interior de la bola que hayan dado paso a la generación de algún tipo de corrosión. La misma situación ocurre para la bola en agua de mar analizada. Por lo tanto, no se observan diferencias respecto con su estado inicial ni tampoco entre ambos medios.

Sin embargo, de acuerdo con la bibliografía revisada (Capítulo 2, apartado 2.7 sobre Fenómenos de corrosión y desgastes que existen en procesos de molienda), la molienda húmeda reúne todos los elementos necesarios para la ocurrencia de un proceso de corrosión activo: gran área superficial de los medios de molienda, un área de superficie de mineral que se muele, un potencial de corrosión y abrasión continua que elimina cualquier película protectora que pueda haberse formado en la superficie de los medios de molienda. Además, el desgaste abrasivo produce superficies frescas, listas para sufrir corrosión, y el producto de corrosión se elimina fácilmente por los diferentes mecanismos de abrasión (Peres Massola, 2016). De acuerdo con esta información, se podrían explicar dos puntos:

- Si durante las pruebas de molienda se generó algún tipo de desgaste más evidente como picado o fisuras producto de los impactos que se generan por la caída libre de los cuerpos sobre los otros (efecto catarata), el desgaste abrasivo pudo eliminar cualquier rastro y evidencia de estos daños sobre la superficie de los cuerpos moledores puesto que no se observan en las imágenes metalográficas. Esto podría justificarse con la pérdida de masa que sufrieron los cuerpos moledores mencionada anteriormente.
- No se puede descartar la ocurrencia del desgaste corrosivo en este estudio, debido a que por efecto de la abrasión que se produce entre el mineral, bolas y el revestimiento, se produce un efecto de pulido en la superficie de los cuerpos moledores que dificulta e imposibilita visualizar cualquier formación de algún tipo de corrosión.

Por otro lado, según Iwasaki I, 1988, en la molienda húmeda, la pulpa debe tener un porcentaje de sólidos para cubrir las bolas y así evitar el contacto directo de las superficies metálicas. Esta afirmación tampoco descarta la ocurrencia de desgaste corrosivo debido a que, si bien la pulpa cubre los cuerpos moledores para protegerlos del desgaste abrasivo, por otro lado, estaría facilitando la corrosión ya que la pulpa tiene un porcentaje de agua que está en contacto directo con los medios moledores.

4.4. Comparación y proyección a escala industrial de la vida útil de los cuerpos molidores en función de su diámetro

La Tabla 4.8, presenta la proyección de la disminución del diámetro de los cuerpos molidores en función de su pérdida de masa, en agua convencional y agua de mar respectivamente. Esta proyección del diámetro fue calculada de forma indirecta en base a la ecuación de la recta obtenida de la Figura 4.2, de la cual se obtiene como resultado la masa perdida en determinadas horas. Por lo tanto, conociendo la masa y la densidad de los cuerpos molidores, se calculó el volumen y posteriormente se despejó el diámetro. Se consideró para la proyección la misma cantidad de horas del estudio a escala industrial mencionado en el Capítulo 2, apartado 2.10 y con bolas de 1 pulgada.

Tabla 4.8: Proyección del diámetro de los cuerpos molidores en función de su masa y volumen.

Horas	Agua Convencional			Agua de Mar		
	Masa	Volumen	Diámetro	Masa	Volumen	Diámetro
0	80,5588	10,33	2,70	80,6773	10,34	2,70
601	75,871	9,73	2,65	76,0496	9,75	2,65
1363	65,2396	8,36	2,52	65,5545	8,40	2,52
1551	53,1418	6,81	2,35	53,6118	6,87	2,36
1910	38,2438	4,90	2,11	38,9048	4,99	2,12
2432	19,2742	2,47	1,68	20,1784	2,59	1,70
2927	-3,5564	-	-	-2,3595	-	-
3461	-	-	-	-	-	-

Se observa en las Figuras 4.10 y 4.11, que durante el periodo de evaluación, la pendiente de la recta que se obtiene con un ajuste lineal, es -0.0004 para ambos casos, y que también coincide con la pendiente obtenida con los datos medidos a escala industrial, por lo tanto, no fue necesario realizar un ajuste o calcular un factor que corrija los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio para contrastarlos y compararlos con los datos a escala industrial presentados en la revisión bibliográfica.

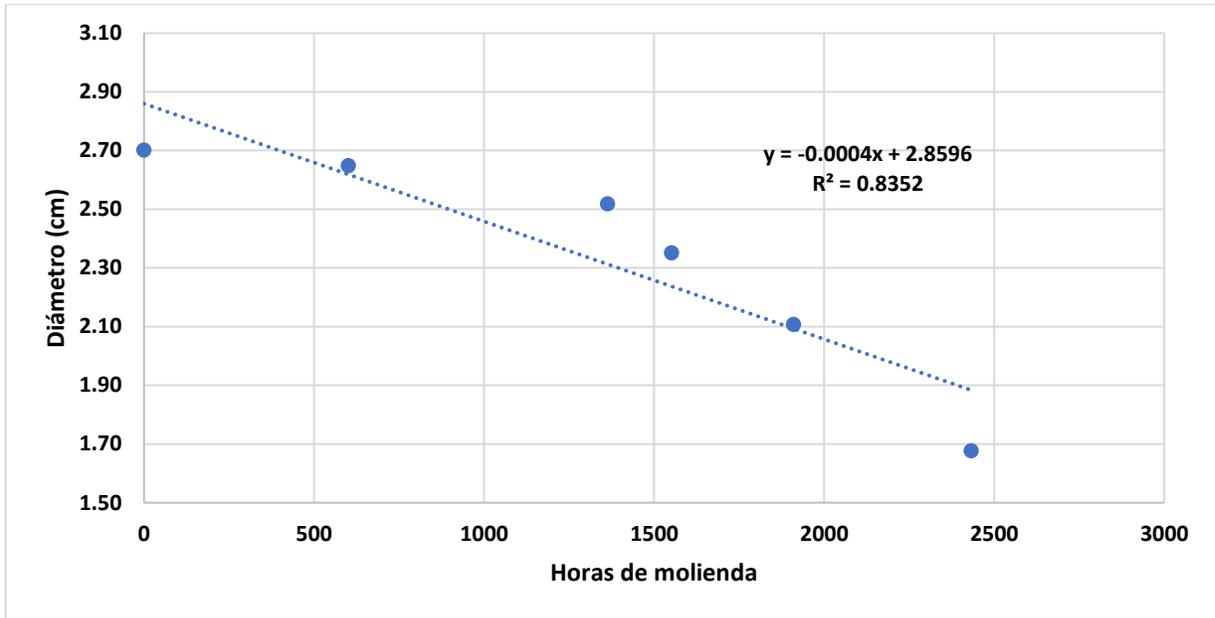


Figura 4.10: Gráfico de los datos obtenidos en la proyección para cuerpos moledores en agua convencional.

Se realizó el mismo procedimiento para el caso de los cuerpos moledores en agua de mar:

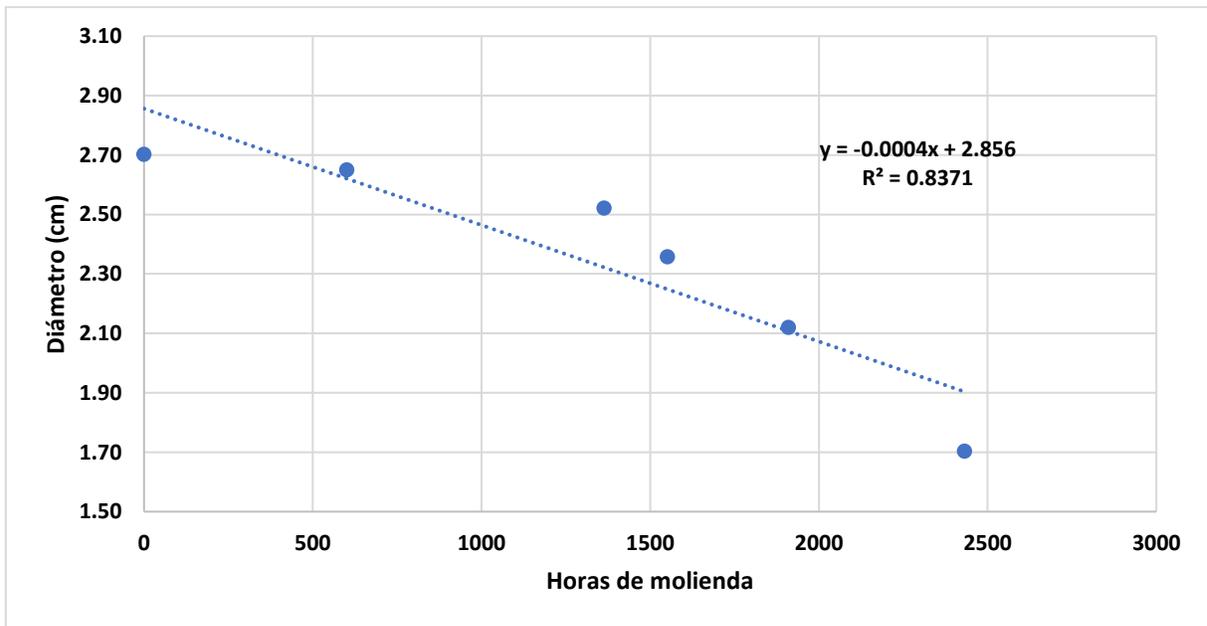


Figura 4.11: Gráfico de los datos obtenidos en la proyección para cuerpos moledores en agua de mar.

La variable “y” entrega el diámetro de la bola en X horas. Por lo tanto, si se considera que la bola es retirada del molino cuando alcanza un diámetro de ½ pulgada (Y=1,27 centímetros), se determina para ambos casos la cantidad de horas que permanece el cuerpo molidor hasta alcanzar el diámetro mínimo usando la ecuación de la recta obtenida en los gráficos de las Figuras 4.10 y 4.11, en agua convencional y agua de mar respectivamente.

Bajo esta lógica, en agua convencional la bola duraría 3.974 horas (165 días) hasta alcanzar 1,27 centímetros de diámetro, versus 3.965 horas (165 días) en agua de mar. Este análisis refuerza la conclusión de que existe diferencia mínima del desgaste entre un medio y otro, y que en este caso es de 9 horas a favor de la vida útil para los cuerpos molidores en agua convencional.

5. CONCLUSIONES

La pérdida de masa de los cuerpos molidores medida a través del tiempo indicó un desgaste lineal y concuerda con otros estudios realizados, ya sea utilizando el peso o el diámetro para el análisis. En este estudio, en el cual se consideró un periodo corto de evaluación (acotado a un semestre académico), la información que se obtuvo de la medición de masa y diámetro demostró que la forma correcta de evaluar el desgaste fue a partir de la pérdida de masa, puesto que el diámetro no varió de forma significativa.

Con respecto a los desgastes por abrasión, impacto y corrosión, no fue posible evidenciarlos a partir de las metalografías realizadas, lo que no significa que no hayan ocurrido; es posible que hayan sido mínimos y al ocurrir en la parte superficial de los cuerpos molidores, cualquier efecto producido por el movimiento al interior del molino pudo haber removido alguna evidencia superficial de desgaste. Cabe destacar que al finalizar cada periodo de molienda, los cuerpos molidores quedaban perfectamente pulidos y limpios debido al roce entre ellos mismos, el mineral y el molino.

La presencia de una mayor concentración de los elementos analizados (Fe, Cr y Mn) en el producto de molienda respecto a la concentración en la alimentación, puede estar relacionada con el desgaste de los cuerpos molidores y revestimiento del molino de los cuales se desprenden partes que pasan a la pulpa. La mejor evidencia para esta conclusión está representada por el Cr, que inicialmente no existía en la muestra de relave y posteriormente fue apareciendo en forma constante.

Bajo las condiciones de este estudio, se concluye que no existen evidencias suficientes para determinar cuál medio genera mayor desgaste en los cuerpos molidores; ya sea en molienda con agua convencional o con agua de mar puesto que, de acuerdo con el análisis por pérdida de masa, se pudo determinar que las diferencias del desgaste entre los medios estudiados eran mínimas. Esto fue apoyado por el análisis estadístico que en todos los puntos analizados entregó como resultado que la diferencia del desgaste que se produjo en los cuerpos molidores en agua de mar no era significativa respecto del desgaste en agua convencional, al 95% de confianza.

De esta forma, poder utilizar agua de mar sin desalar, no reduce el costo energético que significa desplazar el agua desde el mar hasta las plantas de procesamientos, pero sí elimina el costo que significa la construcción de una planta desalinizadora y el impacto ambiental y visual que genera en las zonas donde se instalan.

5.1. Recomendaciones

Se sugiere extender el estudio, realizar más horas de prueba para descartar que las evidencias de desgaste se hacen visibles en una etapa posterior de la vida operacional de los cuerpos molidores, lo que podría ser explicado por los tratamientos térmicos superficiales realizados a los cuerpos molidores para aumentar su dureza.

Evaluar el efecto que tiene el desgaste de los cuerpos molidores en la recuperación de minerales mediante flotación por el uso de agua de mar en el proceso de molienda, para determinar si es factible o no utilizar este medio en una planta de procesamiento de minerales.

Se recomienda que para pruebas de laboratorio se implemente un sistema que permita controlar más variables como por ejemplo la concentración de oxígeno al interior del molino, puesto que también es una variable que influye positiva o negativamente en la corrosión. También es posible variar la densidad de la pulpa, velocidad de operación (rpm), carga del molino, etc.

Estudiar el desgaste de los cuerpos molidores usando rocas con diferente índice de trabajo y en ambos medios. Así como también evaluar el desgaste usando mineral en vez de relave.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Araneda, A. J. (2013). Resumen de la Memoria Diseño de aceros bainíticos para revestimientos de molinos SAG y bolas de molienda. *Memoria, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago*, 15-93.
- Azizi A. (2015). Investigating the controllable factors influencing the weight loss of grinding ball using SEM/EDX analysis and RSM model. *Engineering Science and Technology*, 18, 278-285.
- Azizi, A. (2015). Una investigación del desgaste corrosivo de las bolas de acero en la molienda de minerales sulfurados. *IJMGE*, 49(1), 83-91.
- Bond, F. (1964). Metal wear in crushing and grinding. *American Institute of Chemical Engineers*. Houston Texas.
- Callister, W. D. (2007). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales (Vol. 4). Barcelona: Reverte, 150-175
- Campos, P. (5 de Enero de 2014). DiarioUchile. Recuperado el 24 de Abril de 2018, de <http://radio.uchile.cl/2014/01/05/presentan-proyecto-de-ley-que-obligaria-a-mineras-a-utilizar-agua-desalinizada/>
- Chenje, S. D. (2003). The role of corrosive wear during laboratory milling. *Minerals Engineering*, 16(7), 619-624.
- Chris, A. (2013). Consumption of steel grinding media in mills. *Department of Metallurgical and Minerals Engineering, Western Australian School of Mines, Curtin University, Perth, WA, Australia*, 77-91.
- COCHILCO. (Julio de 2015). Análisis del mercado de insumos críticos en la mienría del cobre. Santiago, Chile, 5-37.
- COCHILCO. (2016). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2016-2027. Santiago, Chile, 19-52.
- COCHILCO. (2017). Presentación a la Comisión de Minería y Energía de la Cámara de Diputados. Santiago, Chile, 1-3.

- COCHILCO. (2017). Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028. Santiago, 12-30.
- COCHILCO. (2017a). Consumo de agua en la minería del cobre al 2016. Santiago, Chile, 33-48.
- Concha, & Menacho, J. (1986). Mathematical model of ball wear in grinding mills: I Zero-order wear rate. 47, 87-96. Powder Technol 47.
- Cuadra P. (2017). Codelco Educa. Recuperado el 23 de Octubre de 2017, de https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_chancado_y_molienda.asp
- David. (Junio de 2016). 911 Metallurgist. *Obtenido de Diseño de Molinos de Bolas y de Barras:* <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/disenio-de-molinos-de-bolas-y-de-barras/>
- E. Rivera. (2012). Análisis del desgaste de medios molidores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos S.A. 10(1), 108-122.
- Economía y Negocios. (2015). "Aumentan plantas desaladoras en Chile y se proyectan cerca de 20 en cinco años". Santiago, Chile. Recuperado el 6 de Junio de 2018, de <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=173478>
- Garavito, J. (2008). Tratamientos Térmicos. *Escuela Colombiana de Ingeniería.*
- Gates, & Daegush. (2008). Effect of abrasive mineral on alloy performance in the ball mill abrasion test. *Wear*, 70, 265:865.
- Hernández, M. (2002). Fundamentos básicos sobre corrosión. *En M. Hernández, Monitoreo de la protección catódica a línea submarina.* Puebla: Universidad de las Américas, 25-113.
- Iwasaki I, P. R. (1988). Nature of corrosive and abrasive wear in ball mill grinding. *International Journal Miner Process*, 22, 60-345.
- Landolt D, M. S. (2001). Electrochemical methods in tribocorrosion: a critical appraisal. *Electrochimica Acta*, 46, 3913-3929.
- LatinoMinería. (28 de Mayo de 2013). Latinominería.com. (G. E. Editec, Editor) Recuperado el 11 de Agosto de 2018, de <http://www.latinomineria.com/2013/05/28/uso-de-agua-de-mar-sin-desalar-en-mineria/>

- Lay, E. O. (2013). Detalles de molienda en seco y molienda húmeda de minerales. Obtenido de <http://geolay.cl/>
- Minería Chilena. (29 de Diciembre de 2014). Minería Chilena. Recuperado el 29 de Julio de 2018, de <http://www.mch.cl/2014/12/29/magotteaux-presenta-bolas-de-molienda-con-mayor-contenido-de-cromo/>
- Moly-Cop. (s.f.). Moly-Cop. Recuperado el 19 de Octubre de 2017, de *Especificaciones Técnicas*: <http://molycop.com/products/grinding-balls/>
- Nataranjan, K. (1996). Laboratory studies on ball wear in the grinding of a chalcopyrite ore. *Interntaional Journal of Mineral Processing*, 46, 205-213.
- Navarro, P. (1991). Disminución del consumo de medios de molienda usando inhibidores químicos de la corrosión. Remetallica, Santiago, 1-6.
- Peres Massola, C. (2016). A discussion on the measurement of grinding media wear. Sao Paulo: Elsevier Editora Ltda, 5(3):282–288
- Pérez, F. M. (2000). Enfoque algorítmico para el cálculo del desgaste en pares de fricción. Madrid: *Revista de Metalurgia*, 410-419.
- Radziszewski. (2002). Exploring total media wear. *Minerals Engineering*, 15(12), 1073-1087.
- Revista Minería Chilena. (14 de Enero de 2016). Agua de mar y desalinización: Una solución mas amigable, pero a mayores costos. *Revista Minería Chilena*. Recuperado el 27 de Abril de 2018, de <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/agua-de-mar-y-desalinizacion-una-solucion-mas-amigable-pero-a-mayores-costos/>
- Rodríguez, L. H., & Muñoz, D. R. (2016). Análisis microestructural de los aceros inoxidables AISI 316, 420 y 430 utilizando la técnica de metalografía a color. Bogotá. Recuperado el 29 de Julio de 2018
- Va Larre. (2008). Estructuras del Acero. En *Metalografía y Tratamientos Térmicos* (Vol. 5, págs. 5-7).
- Valladares, J. A. (2008). Diseño Práctico de un Molino de Bolas. *Tesis, Instituto Politécnico Nacional*, México, 14-25.

Anexos

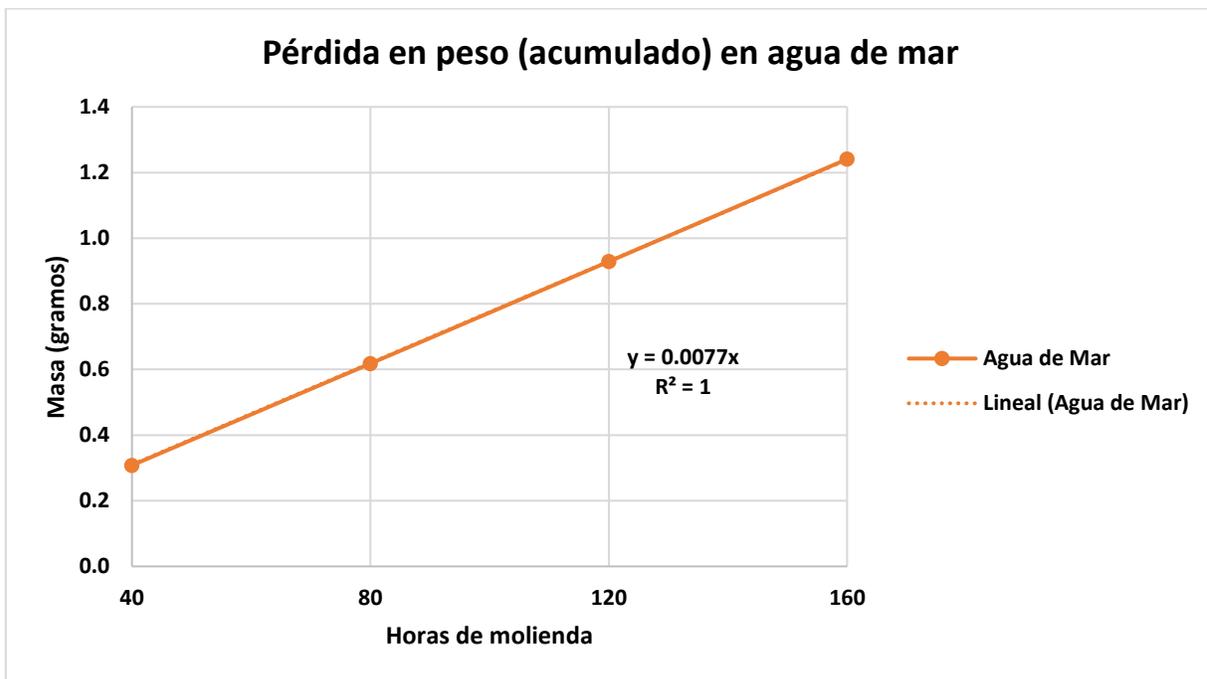
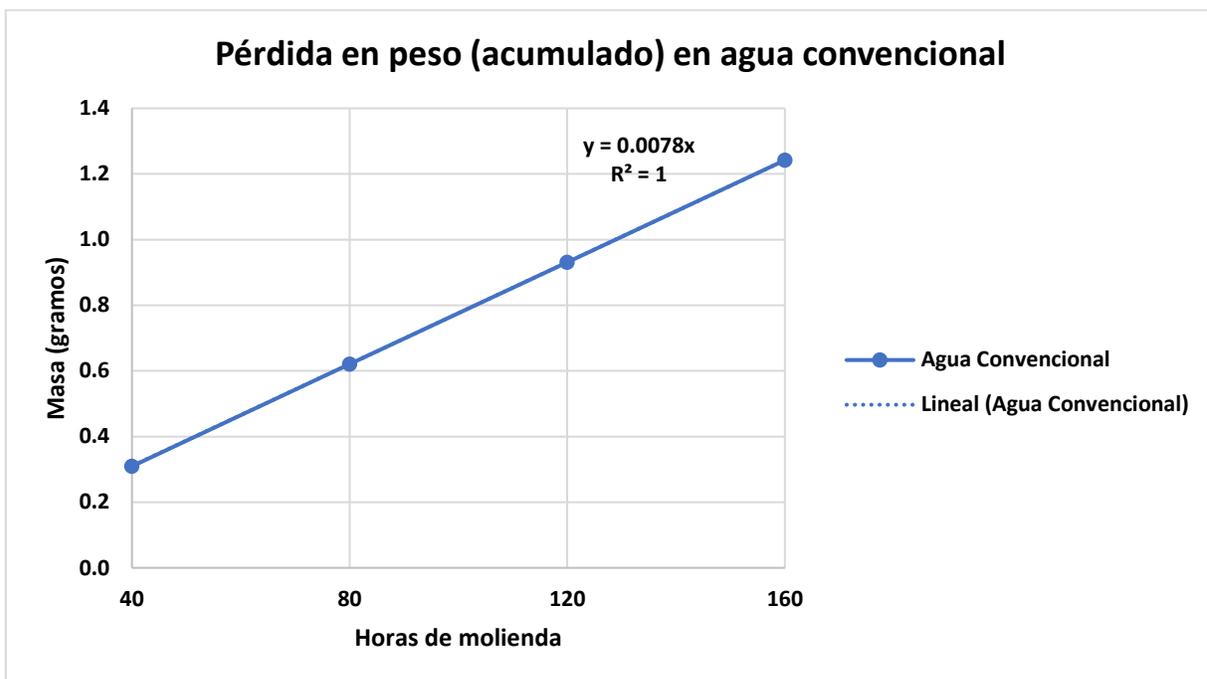
Anexo A: Características molino inicial y condiciones de operación

El molino utilizado para para las primeras 100 horas de operación presenta las siguientes características:

- Diámetro: 17,5 centímetros
- Largo: 22,7 centímetros
- Volumen: 5.460 cm³.
- Carga de bolas: 110 bolas de 1 pulgada
- Carga de mineral: 350 gramos
- Velocidad crítica: 102 RPM



Anexo B: Gráficos de pérdida de peso acumulado para cada medio.



Anexo C: Gráficos de concentraciones acumuladas de Fe, Cr y Mn en el producto de molienda.

Gráfico 1.

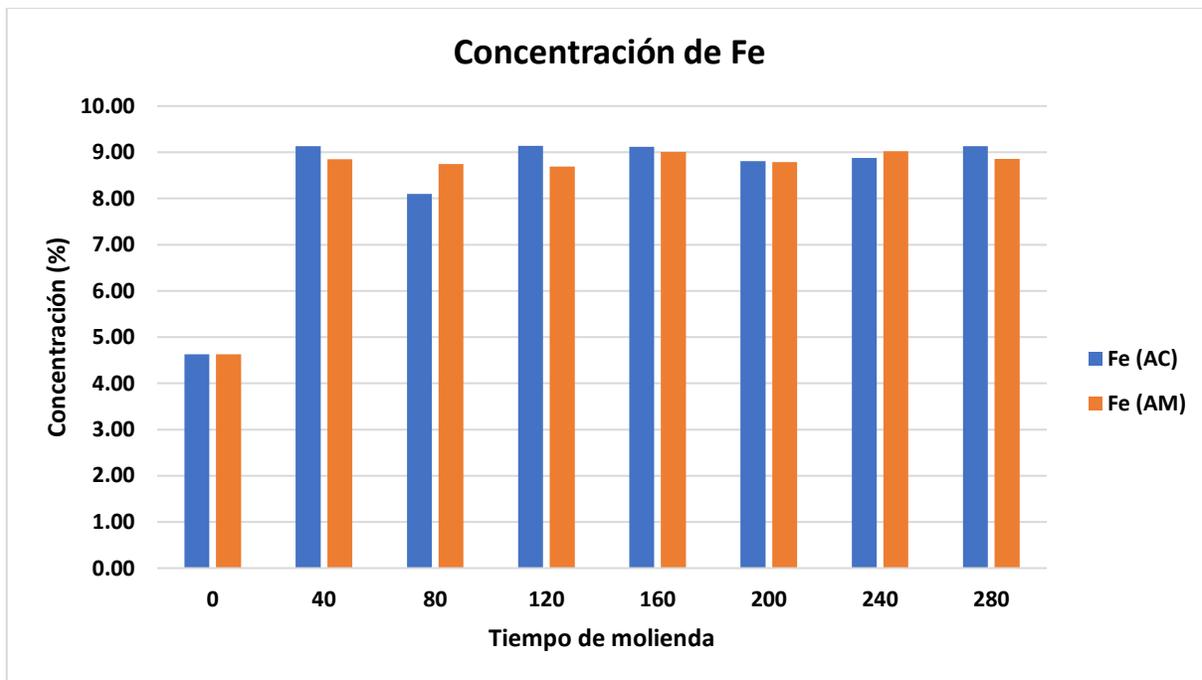


Gráfico 2.

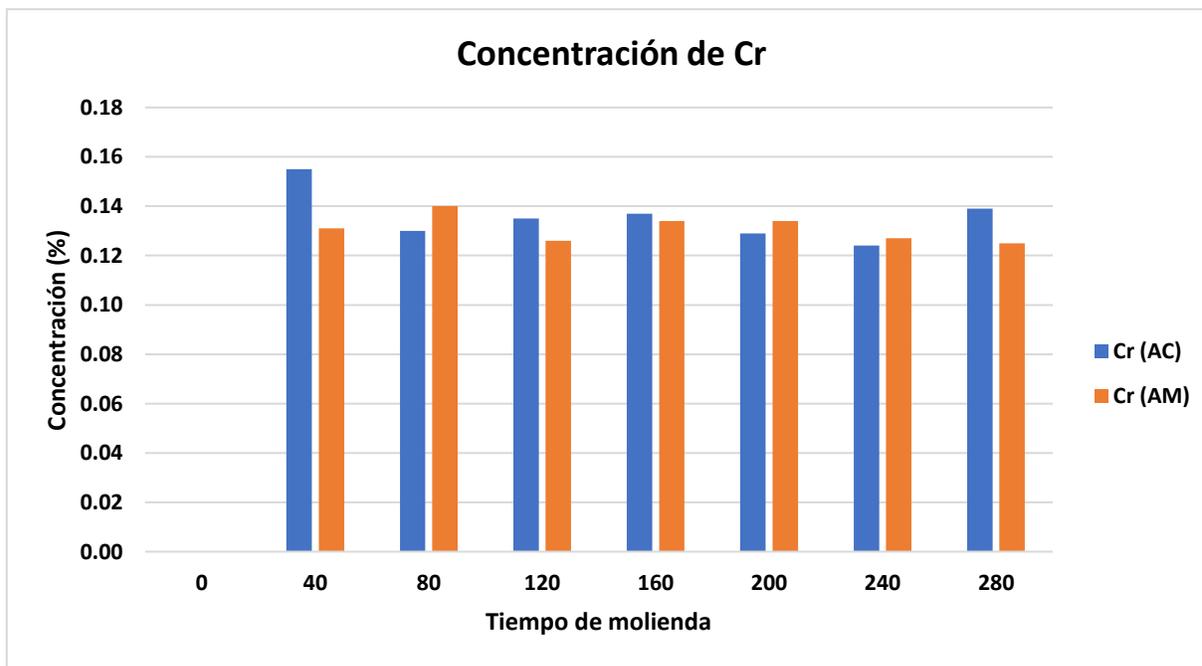


Gráfico 3.

