



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>



UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS Y METARLURGIA
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD



El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **tesis** cuyo título es:

**"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE
LOS MOLINOS DE BOLAS USADOS EN LA MOLIENDA HÚMEDA DE MINERALES
SULFUROSOS"**

Presentado por:

QUISPE GUTIERREZ DEIVI

Estudiante del nivel PREGRADO de la **Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia**. El resultado obtenido es 17% por el cual se otorga el calificativo de:

(APROBADO, Según Reglamento de Evaluación de la Originalidad)

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Observaciones:

APROBADO OBTUVO EL 17% (MENOR O IGUAL AL 20% REQUERIDO)

Ica, 02 de febrero de 2023

.....
DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN
DIRECTOR DE UNIDAD DE INVESTIGACION
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS Y METALURGIA

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUÍS GONZAGA”

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia



TESIS

**Estudio experimental para determinar la velocidad de corrosión
de los molinos de bolas usados en la molienda húmeda de
minerales sulfurosos**

Línea de investigación: Conminución de Minerales

AUTOR: QUÍSPE GUTIÉRREZ DEIVI

**NASCA – PERÚ
2022**

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

INDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
PORTADA	01
DEDICATORIA	02
AGRADECIMIENTO	03
ÍNDICE DE CONTENIDOS	04
ÍNDICE DE TABLAS	05
ÍNDICE DE FIGURAS	06
RESUMEN	07
ABSTRACT	08
I. INTRODUCCIÓN	09
II. ESTRATEGIA METODOLOGICA	11
2.1. Generalidades.	11
2.2. Antecedentes de la investigación.	12
2.3. Marco teórico.	15
2.4. Corrosión de los metales.	21
2.5. Metodología de la investigación.	29
2.6. Desarrollo experimental	29
III. RESULTADOS.	38
IV. DISCUSIÓN.	51
V. CONCLUSIONES	53
VI. RECOMENDACIONES.	54
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	55
VIII. ANEXOS.	56

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Tamices para clasificar la granulometría del material.	32
Tabla 3.1. Resultados del análisis químico del mineral.	38
Tabla 3.2. Resultados del análisis mineralógico del mineral.	39
Tabla 3.3. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia. Duración del ensayo: 40 horas.	40
Tabla 3.4. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia Duración del ensayo: 80 horas	41
Tabla 3.5. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia. Duración del ensayo: 120 horas.	42
Tabla 3.6. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia Duración del ensayo: 160 horas.	43
Tabla 3.7. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia Duración del ensayo: 200 horas.	44
Tabla 3.8. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia Duración del ensayo: 240 horas.	45
Tabla 3.9. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia Duración del ensayo: 280 horas.	46
Tabla 3.10. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia. Duración del ensayo: 320 horas.	47
Tabla 3.11. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia Duración del ensayo: 360 horas.	48
Tabla 3.12. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de Residencia. Duración del ensayo: 400 horas.	49
Tabla 3.13. Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia.	50

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Molino de bolas.	15
Figura 2. Esquema de la trayectoria de las partículas y bolas en el molino	16
Figura 3. Diseños de blindajes para molinos de bolas	17
Figura 4. Blindaje de molino con dos pernos de sujeción.	17
Figura 5. Molino de bolas con blindajes tipo cascada.	18
Figura 6. Caída en cascada.	19
Figura 7. Caída en catarata.	20
Figura 8. Molino de bolas.	21
Figura 9. Corrosión de metal	22
Figura 10. Corrosión uniforme.	23
Figura 11. Corrosión por picadura	24
Figura 12 Corrosión por picadura de un tubo de acero.	24
Figura 13. Corrosión total de una tubería.	24
Figura 14. Corrosión por cavitación en una máquina Diésel	25
Figura 15. Corrosión intragranular.	25
Figura 16. Corrosión electroquímica.	26
Figura 17. Corrosión por fatiga.	26
Figura 18. Corrosión por agrietamiento	27
Figura 19. Corrosión por hendidura.	28
Figura 20. Esquema de un molino de bolas.	57
Figura 21. Bolas nuevas de molino de minerals	58
Figura 22. Bolas de Molino con corrosion intensive	59
Figura 23. Protectores interiores del Molino de bolas	59

RESUMEN

La presente investigación titulada **Estudio experimental para determinar la velocidad de corrosión de los molinos de bolas usados en la molienda húmeda de minerales sulfurosos** es un estudio teórico experimental, cuyo objetivo es determinar la velocidad de corrosión de los molinos de bolas en los cuales se muele mineral sulfuroso, para lo cual se ha diseñado una pulpa con las mismas características que las que se usan en los molinos y en ella se realizaron ensayos a distintos tiempos desde las 40 horas hasta las 400 horas con un distanciamiento entre ensayos de 40 horas, como resultados de estos ensayos se comprobó un desgaste paulatino de las bolas desde 0,2101 g hasta 2,2565 g a 400 horas de ensayo lo que indica una velocidad de corrosión promedio de 5g/ m²/día. La tesis se ha desarrollado en tres capítulos fundamentales; el primero habla sobre las bases del estudio, el segundo capítulo aborda el estudio teórico sobre la corrosión y los molinos de bolas, y el desarrollo experimental donde se citan los métodos y materiales empleados; el tercero expone los resultados de la investigación.

PALABRAS CLAVES: Molino de bolas, corrosión, velocidad de corrosión.

ABSTRACT

The present investigation entitled Experimental study to determine the corrosion rate of ball mills used in wet grinding of sulphide minerals is an experimental theoretical study, whose objective is to determine the corrosion rate of ball mills in which mineral is ground. sulphurous, for which a pulp has been designed with the same characteristics as those used in the mills and tests were carried out at different times from 40 hours to 400 hours with a distance between tests of 40 hours, as results from these tests, a gradual wear of the balls from 0.2101 g to 2.2565 g was verified at 400 hours of testing, which indicates an average corrosion rate of 5 g/m²/day. The thesis has been developed in three fundamental chapters; the first talks about the bases of the study, the second chapter deals with the theoretical study on corrosion and ball mills, and the experimental development where the methods and materials used are cited; the third exposes the results of the investigation.

KEY WORDS: Ball mill, corrosion, corrosion rate.

INTRODUCCIÓN

Cuando se realiza la molienda húmeda de minerales sulfurosos, dentro del molino se producen reacciones químicas que son catalizadas por el choque de las bolas y el movimiento constante, aunque el producto de dichas relaciones es mínimo, en pequeña escala, su carácter ácido, contribuye a la corrosión y desgaste de los protectores del molino, disminuyendo significativamente su vida útil. En el presente proyecto se estudia los efectos de esos minerales sulfurosos sobre el metal que constituye los protectores internos del molino y a qué velocidad se propaga la corrosión en dicho material.

Situación problemática.

En una planta de flotación, el mineral que diariamente se procesa es sulfuroso, es decir, en su constitución química está presente los compuestos de azufre como sulfuro, el cual al contacto con el agua reacciona formando ácido sulfúrico, este es extremadamente corrosivo sobre todo cuando está diluido y ataca el hierro y sus aleaciones incluso al acero inoxidable del que están hechos los protectores y el tambor de los molinos e bolas e incluso las mismas bolas. Este ataque químico es inevitable por lo que es preciso establecer la velocidad de corrosión a la que está expuesto el molino en su conjunto para poder tomar medidas correctivas en el momento adecuado y hacer los cambios de protectores y el mantenimiento respectivo a estos equipos.

Formulación del problema.

Problema general.

¿Experimentalmente se puede determinar la velocidad de corrosión de los molinos de bolas usados en la molienda húmeda de minerales sulfurosos?

Problemas específicos.

- ¿Cuál es la composición química de los metales que conforman la estructura de los molinos de bolas?
- ¿Cómo actúan los sulfuros durante la molienda del mineral con respecto a los metales con que están hechos los protectores y el tambor del molino?

Objetivos del proyecto.

Objetivo General.

Determinar experimentalmente la velocidad de corrosión de los molinos de bolas usados en la molienda húmeda de minerales sulfurosos.

Objetivos Específicos.

- Determinar la composición química de los metales que conforman la estructura de los molinos de bolas.
- Establecer el comportamiento químico de los sulfuros durante la molienda del mineral con respecto a los metales con que están hechos los protectores y el tambor del molino.

Hipótesis de trabajo.**Hipótesis general.**

La determinación de la velocidad de corrosión de los molinos de bolas usados en la molienda húmeda de minerales sulfurosos, a nivel experimental es posible.

Hipótesis específicas.

- La composición química de los metales que conforman la estructura de los molinos de bolas, es la de los aceros inoxidable.
- Los sulfuros durante la molienda del mineral con respecto a los metales con que están hechos los protectores y el tambor del molino, actúan de forma agresiva causando corrosión.

Variables.**Variable Independiente:**

Velocidad de corrosión.

Variable Dependiente.

Molino de bolas.

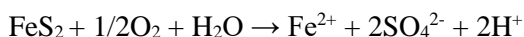
Justificación e importancia.

La presente investigación se justifica desde el punto de vista tecnológico, en tanto permitirá establecer la velocidad de corrosión y el desgaste de los protectores del molino, así como del tambor a fin de hacer las reparaciones respectivas para mantener en funcionamiento el molino y alargar su vida útil a pesar de las condiciones críticas de trabajo.

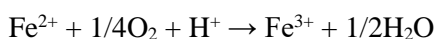
II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Generalidades

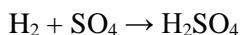
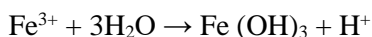
En las minas subterráneas uno de los minerales que más abunda en la zona sur del Perú es el sulfuro, principalmente el sulfuro de hierro, la pirita, el cual se oxida en atmósferas oxigenadas y en presencia de agua líquida o vapor de agua generando el ion sulfato SO_4^{2-} hierro ferroso (Fe^{2+}) y del ion hidrógeno (H^+), estos iones participan en la reacción que da como producto final ácido, según la siguiente ecuación química:



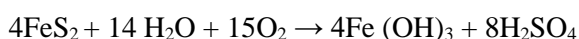
El hierro (II) que inicialmente se forma gracias a la presencia del oxígeno del aire se oxida a hierro (III), tal como se simboliza en la ecuación siguiente:



Cuando el pH de la solución alcanza valores mayores a 3,5 el hierro férrico se precipita como hidróxido de hierro (III) ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), el cual es una sustancia química de color rojizo. En esta reacción de la formación del hidróxido férrico, se genera también iones hidrógeno que se liberan como hidrógeno naciente que rápidamente se une al ion sulfato formando ácido sulfúrico. Las reacciones son las siguientes:



La reacción de la pirita con el oxígeno del aire y el agua se puede representar mediante la ecuación química que a continuación se señala:



Conforme va formándose ácido sulfúrico se neutraliza el hidróxido de hierro (III) que es otro de los productos de la reacción, actúa como oxidante y puede promover la oxidación química de los minerales sulfurosos, dando origen al llamado drenaje ácido, que constituye una solución de pH entre 1 y 3 y que tiene una acentuada capacidad para disolver sales de metales pesados.

En los molinos de bolas durante la molienda húmeda de sulfuros están presentes la humedad y el oxígeno de aire, a parte de los golpes que se producen durante la rotación del molino, por tanto, las reacciones químicas que se producen son las mismas y el ácido sulfúrico generado, ataca la superficie de los medios de molienda y los protectores del casco del molino, durante todo el tiempo produciendo la oxidación y el deterioro progresivo de estos.

2.2. Antecedentes de la investigación.

A nivel internacional:

M, Reyes [1], realizó un estudio sobre el comportamiento superficial de la pirita, la cual se oxida y presenta precipitación de hierro férrico y hierro ferroso durante la molienda a diferentes pH, siendo los pH ácidos (pH 1 – pH 6) en donde se ve una mayor precipitación de hierro sólido cristalino que recibe el nombre de goetita. Conforme se eleva el pH el hierro se oxida de Fe^{2+} a Fe^{3+} , formándose a pH 9 un precipitado sólido identificado como magnetita, Según el estudio durante la molienda se produce una modificación en la superficie de la pirita, presentando un potencial zeta positivo, lo que la hace susceptible a los colectores aniónicos que se utilizan en la flotación de los minerales sulfurados. En el estudio se demuestra que, en la operación de molienda húmeda con bolas de cero, las partículas de pirita y otros sulfuros, captan los productos de precipitación del hierro como la magnetita Fe_3O_4 , oxidándose, lo que indica que el hierro que constituye la masa de las bolas y de las superficies internas de los molinos se van desgastando por corrosión intensiva producida por el mineral sulfurado.

E, Esparza y colaboradores [2], hicieron una investigación de diseño experimental en la que se analizó el comportamiento electroquímico de muestras de acero al carbono, bajo condiciones húmedas, para ello se consideró como electrolitos la presencia de sales y compuestos de azufre como el sulfuro de hidrógeno y mercaptanos. El estudio se llevó a cabo a diferente pH dentro de un margen ácido y pudieron constatar tres etapas importantes en el proceso de corrosión: adsorción, difusión de especies y corrosión localizada. Los análisis desarrollados se hicieron mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), la cual reportó presencia de productos de corrosión a un pH 8.5, a otros pH se pudo comprobar que en el metal se habían generado corrosión por picaduras. El estudio experimental por este método (EDS) dio como resultado la presencia de oxígeno, calcio y cloro cuando el pH es de 8.5, es decir cuando se reporta también la presencia de productos de corrosión.

J, Vallejo [3] realizó una investigación de gabinete sobre los aspectos teóricos sobre corrosión y los métodos para prevenirla. El estudio busca que relacionar la corrosión con el aspecto mecánico considerando en ello las medidas para evitar corrosión dando también las dimensiones necesarias para dar seguridad a los equipos que están sometidos a sustancias corrosivas, siendo la idea fundamental considerar en el trabajo todos los conocimientos sobre corrosión y prevención de la corrosión que sirvan de referencia para los cursos afines con el tema, tales como Metalurgia, Diseño de Máquinas, Montaje y mantenimiento de Equipo. En el estudio el autor concluye que la diferencia entre la corrosión química y la corrosión electroquímica no has diferencia sustantiva y que por ello se debe considerar solo la corrosión electroquímica, la misma que se da en medios húmedos, es decir, en presencia de electrolitos. Sostiene que el fundamento de la corrosión electroquímica es la reacción anódica la cual dona electrones del metal que se

corroe, por lo tanto, la determinación eléctrica de la tendencia de un metal a donar electrones puede servir como un criterio básico acerca de la resistencia a la corrosión de dicho metal.

M, Ultrilla [4] realizó un estudio sobre la obtención de aceros inoxidable por pulvimetalurgia, que es una tecnología que consta de dos etapas, la primera de ellas consiste en generar polvos metálicos por diversos métodos y la segunda es construir objetos a gran escala utilizando para ello moldes. En los cuales el polvo metálico y ciertos aditivos se mezclan y compactan para obtener diversas piezas de calidad muy variada entre las cuales están los aceros inoxidable. Este tipo de acero es muy susceptible a la corrosión debido a la presencia de poros donde se aloja oxígeno y uno de los propósitos del trabajo es reducir esa porosidad y evitar la corrosión por presencia de oxígeno en el material. En el estudio se ensaya el acero obtenido 304L y 316L obtenido por procesos de pulvimetalurgia en medio clorurado empleando cloruro de sodio y cloruro de hierro (III), a temperatura ambiente y a temperatura (60°C) reportando que el grado de corrosión aumenta en estos materiales conforme se aumenta la concentración del cloruro y también cuando la temperatura asciende sobre los 60°C.

L, Sáenz y colaboradores [5], realizaron un estudio experimental para evaluar la predisposición a la corrosión del Acero inoxidable dúplex 2205, en un medio electrolítico en el cual se disuelve el ácido clorhídrico a una concentración del 5% a una temperatura de 65°C. La muestra de acero inoxidable dúplex 2205 se ensayó sometiéndola a tracción en condiciones de baño en soluciones de ácido clorhídrico durante tiempos que fluctúan entre 24 y 72 horas. En el estudio se reporta que la corrosión aumenta conforme aumenta la temperatura que llegó hasta los 675°C y conforme aumenta la concentración del ácido; el grado de corrosión obtenido en los ensayos indican que se llegó a un 40% en 72 horas. En todas las condiciones las probetas de tracción manifestaron una fractura tipo dúctil con mecanismo de coalescencia de cavidades. En las condiciones de inmersión al ácido clorhídrico, no se observó un cambio significativo en la resistencia mecánica, pero si se observó un incremento de la ductilidad del acero inoxidable dúplex. A través de la MEB se pudo evidenciar el deterioro microestructural de las tres condiciones sometidas al medio corrosivo, observándose corrosión por picadura, de tipo selectiva sobre los granos de ferrita.

Antecedentes nacionales.

G, Rivera [6], presentó su Informe de Servicio Profesional el cual estuvo orientado a conocer los tipos y mecanismos de corrosión en acero y la aplicación adecuada de las normas técnicas existentes, en la inspección y control de calidad del proceso; La finalidad de este trabajo fue gestionar e implementar los procedimientos de última generación, más avanzados a fin de controlar de manera más eficiente la corrosión, utilizando para ello

recubrimientos protectores. Asegurando una mayor expectativa de vida útil de los activos, la seguridad operativa y minimizando las pérdidas económicas y el impacto ambiental. En el estudio se aborda también la evaluación de un recubrimiento a base de zinc inorgánico etil silicato, el Jet Zinc I-860, el cual fue ensayado para establecer sus ventajas y desventajas de trabajo bajo las condiciones ambientales de la provincia de Arequipa. En las fases de aplicación, humectación, repintado, curado y pruebas de adherencia; con el fin de generar un aporte, para su uso en futuros proyectos.

W, Mamani [7] en su estudio sobre aguas ácidas de mina, aborda teóricamente la formación de este tipo de contaminante y los peligros que ella representa para el medio ambiente ya que contamina los suelos y las aguas superficiales y subterráneas. En el estudio se aborda también el mecanismo químico de la formación de las aguas ácidas a partir de los sulfuros en presencia de agua y del oxígeno del aire, que es el mismo mecanismo que genera el ácido sulfúrico que se genera en las superficies metálicas de los equipos mineros. La investigación es experimental y explicativa; en ella se hicieron ensayos de neutralización con muestras de 500 ml de agua cuyo valor de pH de 3,38 y con concentraciones de metales pesados disueltos como Cu, Fe, Al, Zn, Ni y Mn; en cuyo resultado final de los ensayos de neutralización para un tiempo de 05 a 10 minutos se obtuvo pH de 6,5 y 8,5 con la aceptable precipitación de los metales pesados disueltos como: hierro en 93,84 %, cobre en 80,95 %, aluminio en 99,37 %, zinc en 86,88 %, níquel en 10,3 % y manganeso en 95,55 %. Donde la dosis óptima es de 0,4 g de cal por litro de agua ácida.

S, López [8] en aborda el estudio del uso de pintura epóxica de alta resistencia elaborada a partir de pigmentos de zinc para evitar la corrosión. En el estudio se aborda teóricamente el estudio detallado de la corrosión y del tipo de corrosión que se produce en los metales, y experimentalmente se hacen los respectivos ensayos para comprobar la eficiencia de protección de la pintura a partir de pigmentos de zinc. Se plantea el diseño del sistema de protección con pintura, independientemente el tipo pintura que se utilice, se debe tener en cuenta los factores ambientales a los que estará expuesta la estructura, para poder plantear un sistema óptimo para dicho ambiente. El sistema realizado se basó en aspectos tanto técnicos como económicos, como resultado, se estableció que la pintura propuesta ofrece una mayor protección contra la corrosión a las superficies metálicas, incluso de metales que están expuestos a las condiciones de agua de mar y la brisa marina.

Antecedentes locales.

No existe registro alguno sobre investigaciones relacionadas con el tema que se desarrolla en el presente proyecto en las Universidades locales.

2.3. Marco teórico.

2.3.1. Molino de bolas.

Los molinos de bolas por su forma física son cilindros que se apoyan en posición horizontal sobre chumaceras con un sistema de rodaje que le permite girar libremente con un mínimo de rozamiento. La rotación del molino es posible gracias a que se une mediante los engranajes de un sistema de fuerza con la catalina del molino. El sistema de fuerza está compuesto por un motor eléctrico y un reductor que le permite rotar a determinadas velocidades. Esta velocidad es siempre el 80% de la velocidad crítica, lo que le permite moler ya que esto ocasiona que los medios molidores caigan, durante el giro, en forma de cascada sobre el mineral a moler.

Para evitar la corrosión y el desgaste de la estructura interna del molino, ésta se cubre con unos protectores de acero de diferente diseño, los cuales no solamente protegen la carcasa del molino sino, que además permiten sujetar las bolas y levantarlas hasta una cierta altura que asegura el choque efectivo de las bolas contra otras que es el mecanismo de molienda que permite la reducción del tamaño del mineral.



Fig.1. Molino de bolas. (Fuente: Compañía Will Supply)

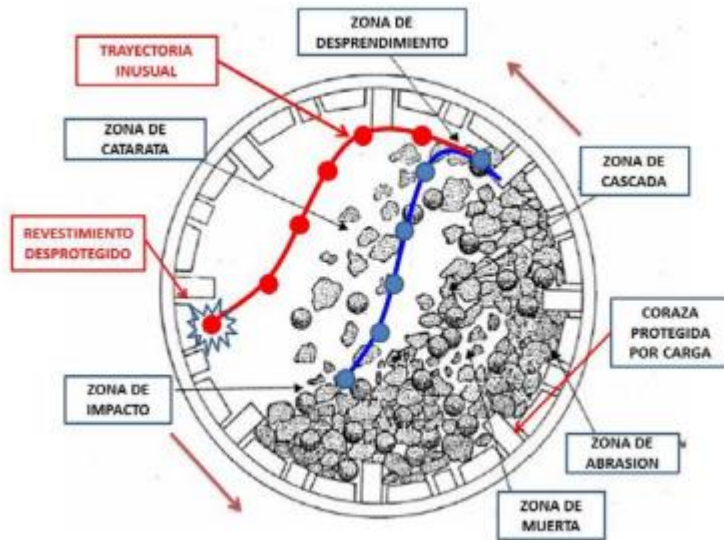
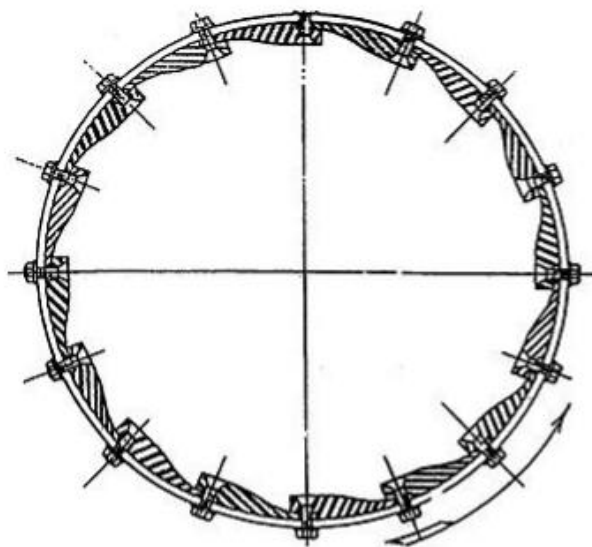
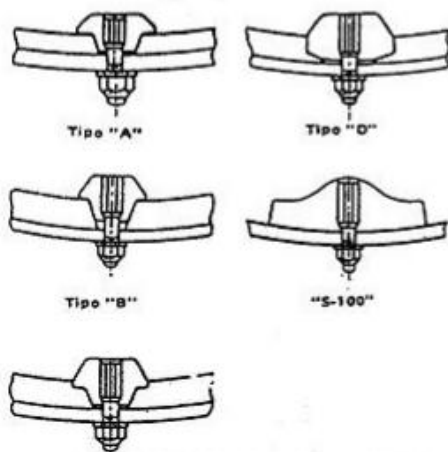


Fig. 2. Esquema de la trayectoria de las partículas y bolas en el molino (Fuente: Muñoz, L. 2018, Diseño del proceso de fabricación de una pieza fundida, lifter molino sag)



VIII-13. Blindaje con placas en cascada



Tipo "C" VIII-14. Diversas formas de blindajes

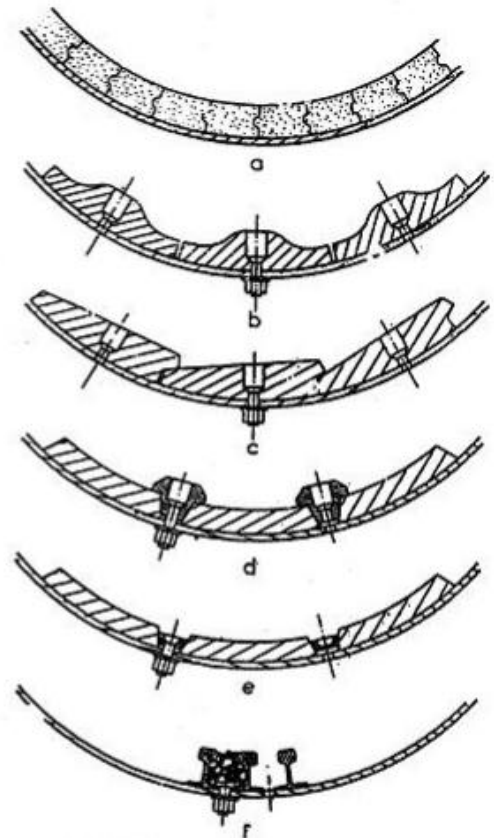


Fig. V-65. — Revêtements de broyeurs
 a) revêtement en briques jointoyées au ciment.
 b) blindage en forme de vagues
 c) blindage à recouvrements.
 d) blindage type Lorain.
 e) blindage de plaques.
 f) revêtement réalisé avec deux rails.

Fig. 3. Diseño de blindajes para molinos de bolas (Fuente: Fueyo, L. 2016)

Los protectores o blindajes internos son placas de acero aleado que le asegura una buena resistencia a la abrasión, desgaste y corrosión, se sujetan directamente a la pared del cilindro mediante pernos por ello la apariencia tan singular del molino de bolas visto desde la parte exterior.

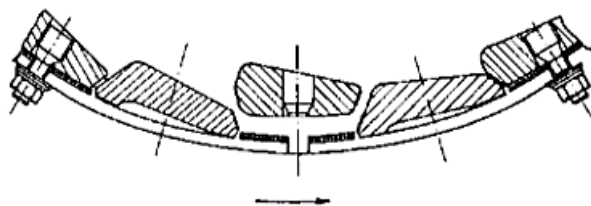


Fig.4. Blindaje de molino con dos pernos de sujeción. (Fuente Duda: 2017)



Fig.5. Molino de bolas con blindajes tipo cascada. (Fuente: Empresa Fundición Metal Norte – Chile)

Los molinos de bolas trabajan con bolas de hierro fundido o acero forjado, como medios molidores, las cuales según el tipo de material que se requiere obtener finalmente pueden tener diferentes diámetros: 4 pulgadas si se quiere una molienda gruesa y de 3/8 de pulgadas si se requiere un material fino (de molienda fina). Estas últimas también se emplean para la remolienda del mineral, cuando este es separado en los hidrociclones y devuelto al circuito.

Normalmente los medios molidores (bolas) de los molinos son de acero. Las bolas de acero se fabrican de aceros con durezas 400/500HB, 500/600 HB y 600/700 HB y en diferentes diámetros. Los diámetros más usados son de 25 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm y 100 mm

Cuando el molino inicia su rotación las bolas y el mineral que está sobre la superficie del protector interno se eleva en la dirección de rotación hasta un punto en el cual por su peso el material y las bolas caen en forma de cascada o de catarata. Ambos tipos de caídas dependen de la velocidad de giro del molino (la cual siempre es menor a la velocidad crítica), en ocasiones estos dos tipos de caídas se dan en simultáneo. Cuando rota el molino tanto la pulpa del mineral como los medios de molienda inician su movimiento generando entre ellos fricción; esta fricción permite que el material vaya reduciendo su tamaño. Esta reducción de tamaño es resultado de la fricción entre las partículas del

mineral y el roce con las bolas, de esta manera se produce también el desgaste de las bolas cuando ellas se froten entre si, esto puede suceder por el peso que soportan entre ellas y cuando la densidad de la pulpa es muy baja, y resulta muy fluida. La densidad de la pulpa debe formar una masa con tal consistencia que esta se pegue a las bolas y las proteja del choque metal-metal, pero si constituir una masa pegajosa difícil de separarse de las bolas. Esa densidad es la ideal para que la molienda se realice eficientemente en el tiempo y con mayor rendimiento.

La velocidad crítica del molino de bolas en la molienda húmeda es en la práctica entre el 70 u 80% de la calculada, a velocidades cercanas al 70% se da la caída por cascada, la cual es también efectiva; a velocidades cercanas a los 80% las caídas son de catarata, en la cual hay mayor desgaste de las bolas por el impacto entre ellas y contra el blindaje.

De todo lo anteriormente dicho se deduce que dentro del molino, durante la reducción de tamaño de las partículas de mineral se dan tres tipos de movimientos de las bolas: el primero es el movimiento de rotación alrededor de su propio eje, el segundo es la caída en cascada en la cual las bolas caen rodando sobre las superficie de las otras bolas y de la pulpa, sin separarse de ellas tal como lo muestra la figura 6 y el tercer movimiento es la caída en catarata de las bolas, las cuales se separan del conjunto de bolas y son lanzadas hacia el “pie” de la carga, en un movimiento curvilíneo, como se ve en la figura 7.

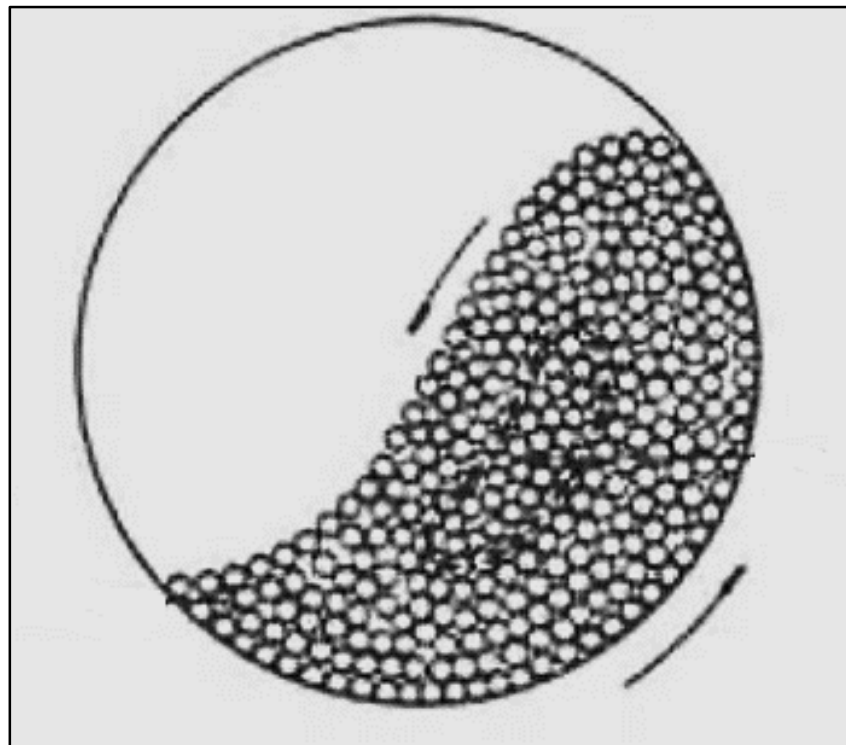


Fig.6. Caída en cascada. (Fuente: Blanco, A. 2015)

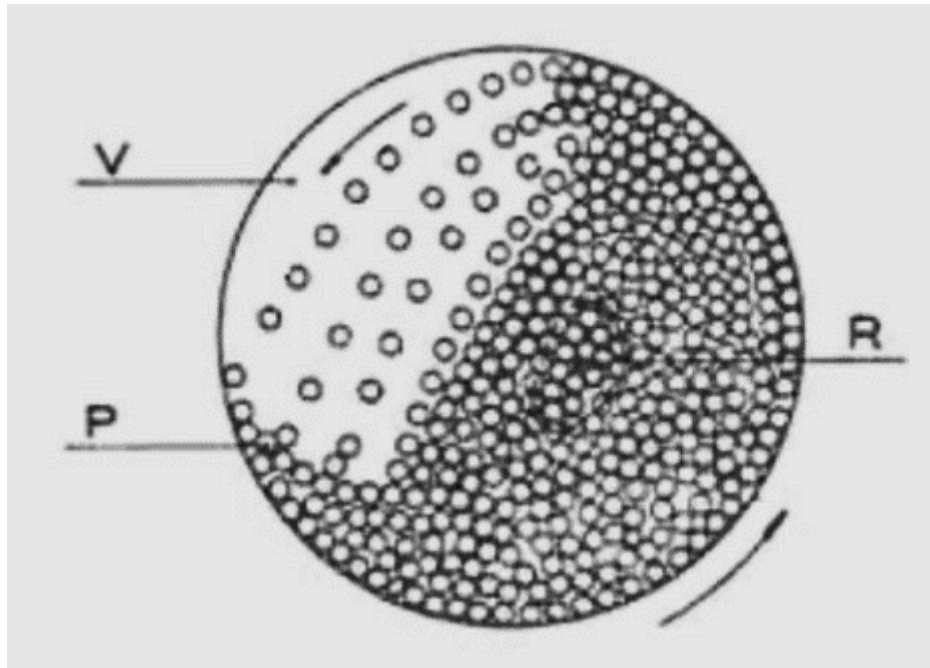


Fig.7. Caída en catarata: V – velocidad de rotación del molino, R – rotación de las bolas sobre su propio eje, P – pie de la carga (Fuente: Fueyo, L. 2015)

Los movimientos de rotación y de cascada permiten una molienda fina, mientras que el movimiento de cascada da como resultado una molienda gruesa ya que en este caso es por impacto, haciendo que la bola caiga sobre las partículas más grandes, partiéndolas por el impacto.

Como se puede deducir la efectividad de la molienda depende de tres factores fundamentales: la velocidad crítica, la capacidad portante de los blindajes y del tipo de caída que se genere dentro del molino. La velocidad crítica del molino es la velocidad mínima que permite que las bolas y la pulpa se peguen a la superficie interna del molino en el momento de la rotación, gracias a la fuerza centrífuga. Cuando, durante la rotación se excede esta velocidad entonces las bolas y el material se pegan a las paredes internas del molino de manera permanente, no llevándose a cabo la molienda, en otras palabras, la molienda sería nula. Por otro lado, si la velocidad es muy baja solo habría fricción y caídas de cascada, lo cual produce finos pero que demoraría demasiado un periodo de molienda y por consiguiente habría un gasto excesivo de energía lo cual a su vez se traduce en aumento de costos.

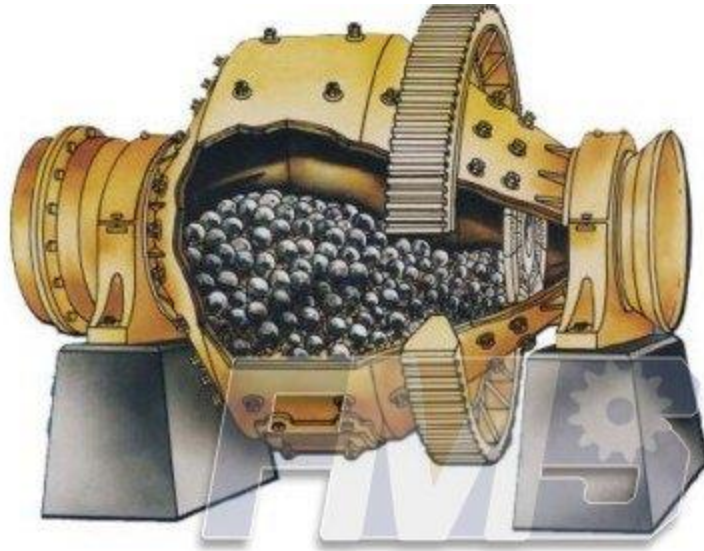


Fig. 8. Molino de bolas (Fuente: Carbosystem)

2.4. Corrosión de los metales.

La finalidad de esta tesis es demostrar la acción corrosiva de los sulfuros sobre las superficies internas del molino de bolas que a pesar de ser de acero forjado o de acero aleado, principalmente con manganeso para darle la resistencia necesaria para soportar los choques sucesivos de los medios molidores sobre la superficie de los protectores y entre ellas, bajo las condiciones críticas de trabajo del molino estas superficies se ven afectadas por el ácido sulfúrico que se genera.

Cuando los metales se oxidan o corroen incorporan átomos del medio ambiente hasta el punto de aumentar su volumen y generar una gran fuerza expansiva, capaz de romper o levantar una construcción o grandes tuberías. La corrosión de metales, o proceso de deterioro de éstos por agentes presentes en el medio ambiente, constituyen un problema generalizado en todos los países. Los metales pueden ser lentamente atacados por el oxígeno de la atmósfera, oxidando sus primeras capas superficiales hasta avanzar hacia el interior de sus estructuras. Sin embargo, el proceso de corrosión puede acelerarse cuando los metales están expuestos a una atmósfera con altas concentraciones de sales o compuestos químicos productos de la contaminación. Uno de los aspectos más sorprendentes del proceso corrosivo se revela por el aumento de volumen del cuerpo oxidado. En un proceso lento, pero inexorable, éste extrae átomos del medio ambiente que lo rodea y los acomoda en su interior, generando un nuevo volumen expandido. La fuerza que permite este proceso es tal que teóricamente al menos puede ser capaz de levantar cualquier construcción.



Fig. 9. Corrosión de metal (Fuente: Brasunas, A)

La corrosión es el deterioro de un material debido a la interacción química con su entorno. Es un proceso natural en el que los metales convierten su estructura en una forma más estable químicamente, como óxidos, hidróxidos o sulfuros. Las consecuencias de la corrosión son demasiado comunes. Los ejemplos familiares incluyen la oxidación de paneles y tuberías de la carrocería de automóviles y muchas herramientas. La corrosión suele ser un fenómeno negativo, ya que se asocia con la falla mecánica de un objeto. Los átomos de metal se eliminan de un elemento estructural hasta que falla, o se acumulan óxidos dentro de una tubería hasta que se tapa. Todos los metales y aleaciones están sujetos a corrosión. Incluso los metales nobles, como el oro, están sujetos a un ataque corrosivo en algunos entornos.

La corrosión ocurre en muchas y muy variadas formas, pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

1. Naturaleza de la sustancia corrosiva. La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que, para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
2. Mecanismo de corrosión. Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.
3. Apariencia del metal corroído. La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas. La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para una discusión preliminar que en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local. En el ataque microscópico, la

cantidad de metal disuelto es mínima y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea visible.

Tipos de corrosión.

1. Corrosión Uniforme. La corrosión uniforme o general tiene como particularidad desarrollarse con la misma rapidez a lo largo de toda la superficie, y puede describirse como la corrosión causada por un ácido en un medio acuoso, cuyas propiedades protectoras sean mínimas. Este tipo de corrosión permite ser medida en valores promedios anuales, en largos tramos de superficies expuestas, así por ejemplo, el acero se corroe en el agua de mar a una velocidad relativamente uniforme e igual a 0.13 mm/año.



Fig. 10. Corrosión uniforme. (Fuente Brasunas, A.)

2. Corrosión por picadura. Se denomina así al tipo de ataque local formado cuando la velocidad de la corrosión es mayor en unas zonas comparadas con otras. Si se produce ataque apreciable confinado en un área fija del metal relativamente pequeña, la cual se convierte en ánodo, las picaduras resultantes se definen como profundas. Si el área de ataque es relativamente grande y no tan profundas, las picaduras se consideran superficiales. En ocasiones se expresa la profundidad de las picaduras por el término factor de picadura. Este factor es la relación de la penetración máxima producida en el metal a la penetración media determinada por la pérdida de peso de la muestra. Cuando el factor de picadura es la unidad representa un ataque uniforme. Generalmente las perforaciones crecen en dirección de la gravedad, extendiéndose hacia abajo en superficies horizontales y con menor frecuencia en superficies verticales, requieren tiempo para formarse antes de ser visibles.



Fig. 11. Corrosión por picadura. (Fuente: Brasunas, A.)



Fig. 12. Corrosión por picadura de un tubo de acero (fuente: Brasunas, A.)



Fig.13. Corrosión total de una tubería. (Fuente: Brasunas, A.)

2. Corrosión por Cavitación. Es la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie de contacto dinámico metal-líquido, como consecuencia de los cambios en las presiones del líquido. Ocurre cuando el valor de la presión absoluta del fluido es menor a la presión de vaporización del mismo. Los objetos metálicos vecinos sufren daños mecánicos debido a las repetidas ondas de choque producidas por el colapso de las burbujas dentro del fluido.

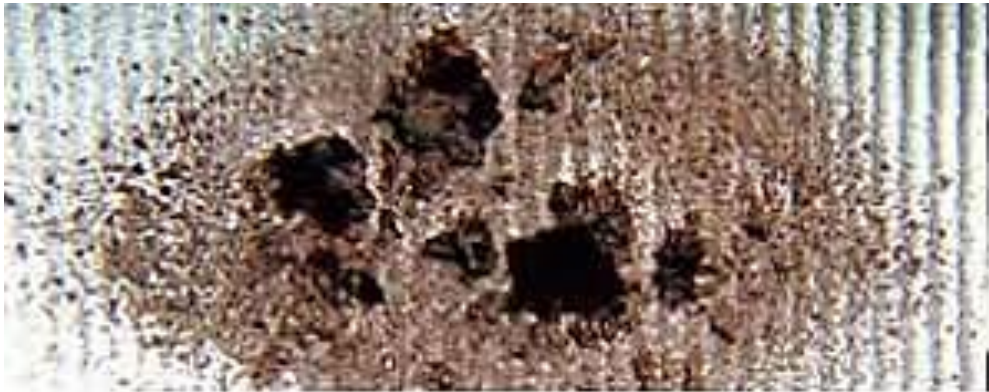


Fig. 14. Corrosión por cavitación en una máquina Diésel (Fuente: Brasunas, A.)

4. Corrosión Intergranular. Es un tipo de ataque localizado, producida en los espacios limitantes de los granos de un metal produce pérdida de la resistencia mecánica y de la ductilidad. El material del área limitada atacada, donde están los espacios intergranulares, actúa como ánodo, los cuales, a su vez, están en contacto con las superficies de los granos con un tamaño de grano mayor y actúan como cátodos. Este ataque suele ser, con frecuencia, rápido, penetra con profundidad en el metal y algunas veces causa averías catastróficas. Se da en procesos donde la estructura del material es modificada; ejemplo, aceros inoxidables con tratamientos térmicos inadecuados.



Fig. 15. Corrosión intragranular (Fuente: Brasunas, A.)

5. Corrosión Galvánica. La corrosión galvánica o bimetálica es el resultado de la exposición de dos metales distintos en el mismo ambiente, y más notable cuando están conectados eléctricamente en forma directa; en base al potencial relativo de ambos metales. Aquí, el más reactivo (ánodo) se corroerá a expensas del más pasivo (cátodo), ofreciendo protección para el metal catódico. Este tipo de corrosión depende del potencial o tendencia a la corrosión de los metales expuestos, de la mayor o menor cercanía entre los mismos, de la conductividad del ambiente donde se encuentran y del área de contacto.

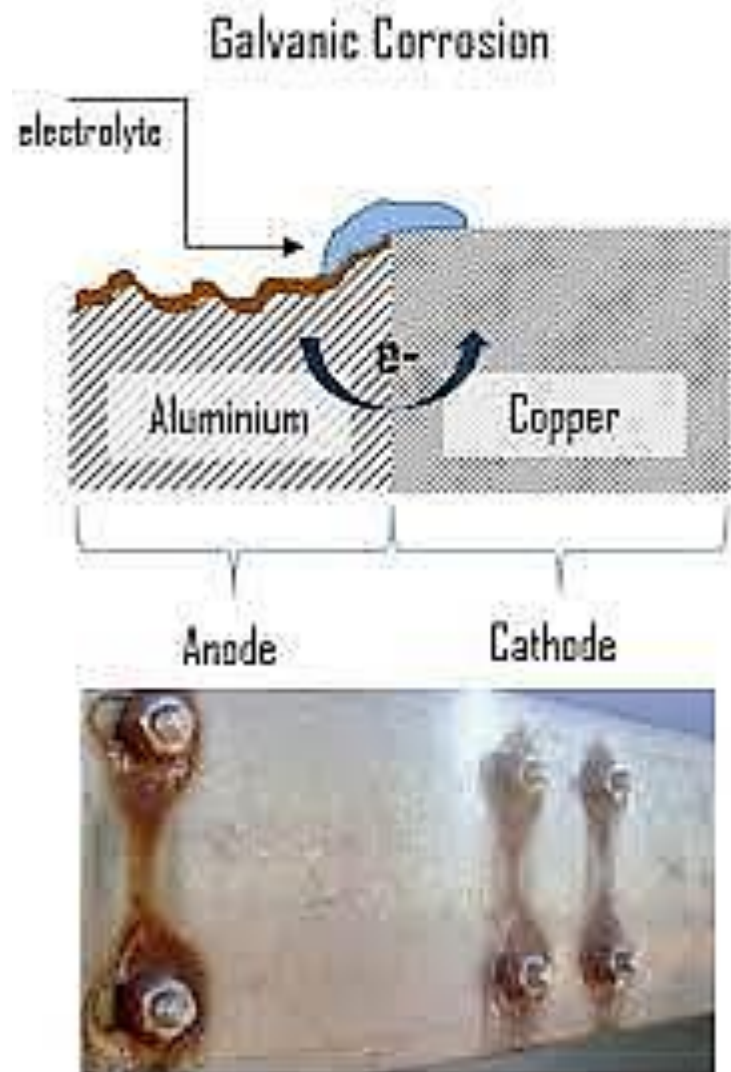


Fig.16. Corrosión electroquímica. (Fuente: Brasunas)

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes se sumergen en una solución conductora en presencia de alguna diferencia de potencial y hay un flujo de electrones entre los metales. También puede tener lugar con un metal con heterogeneidades (disimilitudes) (por ejemplo, inclusiones de impurezas, granos de diferentes tamaños, diferencia en la composición de los granos o diferencias en la tensión mecánica). El metal que es menos resistente a la corrosión se convierte en ánodo y el

metal con mayor resistencia a la corrosión se convierte en cátodo. La corrosión de la resistencia menos corrosiva suele aumentar y el ataque a material más resistente disminuye. Existe una diferencia en el potencial eléctrico entre los diferentes metales y sirve como fuerza motriz para el flujo de corriente eléctrica a través del corrosivo o electrolito.

La corrosión galvánica ocurre solo si se cumplen las siguientes condiciones:

- Deben estar presentes dos metales diferentes
- Los dos metales deben estar en contacto o debe haber una ruta conductora de electricidad entre los dos.
- Debe haber una ruta eléctricamente conductora para que los iones se muevan del “ánodo” al “cátodo”.

Si no se cumple alguna de estas condiciones, no es probable que se produzca corrosión galvánica.

La corrosión galvánica solo provoca el deterioro de uno de los metales. El más fuerte, más noble es catódico (positivo) y protegido. Este es el mecanismo de los ánodos galvánicos, que son el componente principal de un sistema de protección catódica galvánica (CP) que se utiliza para proteger de la corrosión las estructuras metálicas enterradas o sumergidas. En algunos casos, la corrosión galvánica puede resultar útil.

6. Corrosión por Fatiga. Este tipo de corrosión ocurre si un metal se agrieta cuando está sujeto a repetidos esfuerzos de tracción. La resistencia a la fatiga de un metal será significativamente menor cuanto menor sean los esfuerzos cíclicos en un ambiente corrosivo.



Fig. 17. Corrosión por fatiga. (Fuente: Brasunas, A)

7. Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos. El agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo se produce, cuando un metal está en un medio corrosivo específico y a un esfuerzo de tracción constante. Este se agrieta de inmediato o después de un tiempo dado.

En el acero de la industria del gas natural, esto ocurre cuando el ambiente corrosivo es H₂S y la resistencia baja a valores mucho menores cuando el gas está presente.



Fig. 18. Corrosión por agrietamiento. (Fuente Brasunas, A.)

8. Corrosión por hendidura. Cuando se tiene alguna discontinuidad en la geometría de la superficie del metal en presencia de un medio corrosivo se puede desarrollar este tipo de corrosión. Para que se presente la corrosión por hendidura, la hendidura debe ser muy cerrada, con dimensiones menores a un milímetro; no es necesario que las dos superficies de aproximación sean metálicas. También se ha reportado corrosión por hendiduras formadas por varios materiales no metálicos (polímeros, asfaltos, vidrio, neopreno) en contacto con superficies metálicas.



Fig. 19. Corrosión por hendidura. (Fuente: Brasunas, A)

2.5. Metodología de la investigación.

Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación.

Tipo de investigación: Aplicada

Nivel: Explicativa.

Diseño: Experimental.

Población y muestra.

Población.

Estuvo constituida por las plantas de beneficio dedicadas a la flotación de minerales sulfurosos.

Muestra:

La muestra estuvo conformada por los molinos de bolas de la planta Mercurio de Nasca, la cual se dedica a la flotación de minerales sulfurosos.

Técnicas de recolección de información.

Las técnicas empleadas fueron: las marchas analíticas para establecer la velocidad de corrosión.

Instrumentos de recolección de información.

Los instrumentos fueron, los análisis de laboratorio y las corridas experimentales para verificar los valores de los parámetros del proceso de molienda.

Técnicas de análisis e interpretación de datos.

Se hizo el análisis estadístico de datos, con las respectivas tabulaciones e interpretación y discusión de resultados.

2.6. Desarrollo experimental.

2.2.1. Materiales, instrumentos y equipos empleados.

El estudio experimental de la presente tesis se llevó a cabo en el laboratorio de metalurgia de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional San Luís Gonzaga, localizado en la Ciudad de Nasca. En dicho laboratorio básicamente se han desarrollado tres líneas de investigación:

- a. La molienda del mineral sulfuro de cobre.
- b. El análisis de la pulpa obtenida.
- c. Determinación de la velocidad de corrosión, determinada por diferencia de peso.

En la cancha de minerales donde se recogieron las muestras de mineral sulfurado, se emplearon:

- Balanza de 10 Kg,
- Bolsas de rafia para unos 15 Kg de mineral.
- Pala y comba para reducir el tamaño de los trozos de mineral demasiado grandes.
- Implementos de seguridad personal

Para realizar el cuarteo del mineral se utilizaron los siguientes implementos:

- Regla de cuarteo
- Manta plástica de cuarteo
- Cuchara para cuarteo
- Bolsas de plástico
- Balanza tecnoquímica
- Chancadora de quijada de laboratorio
- Malla 10

Para la determinación de la gravedad específica del mineral se necesitó:

- Muestra de mineral chancado a malla -10
- Agua destilada
- Fiola de 100 mL
- Pizeta
- Espátula
- Balanza tecnoquímica.

Análisis granulométrico

- Muestra del mineral chancado a malla -10 un total de 0,5 Kg
- Serie de tamices ASTM (mallas 35,48,65,100,150,200,270)
- Equipo de RO-TAP
- Balanza tecnoquímica
- Vidrio de reloj
- Plato pequeño de plástico
- Bolsa plástica pequeña
- Plumón tinta indeleble, cinta adhesiva

Para la operación de molienda del mineral se requirió de la siguiente:

- Mineral chancado a malla -10, un total de 5 kg.
- Molino de bolas de 9,8" x 7,8" (monofásico de 1750 rpm 60 Hz, 220 v, 15,8 A)
- Mallas ASTM 100, 150, 200 y 270
- Balanza analítica precisión 0,0001g
- Cronómetro
- Bolsas plásticas de kg
- Plumón y cinta adhesiva
- Bolas para molinos de diámetros: 3, 3,45, 4 cm
- Balanza de precisión

Para realizar la determinación de la velocidad de oxidación:

- Balanza analítica con una precisión de 0,0001 g.
- Horno de secado.

- Agua destilada.
- Vaso de precipitados.

2.2.3. Procedimientos experimentales.

Las pruebas experimentales se realizaron en laboratorio o metalúrgico de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional San Luís Gonzaga, localizado en la ciudad de Nasca. En este laboratorio se llevan a cabo todas las etapas necesarias para preparar el mineral para las pruebas de flotación y el análisis del concentrado obtenido. Esto quiere decir, que primeramente se llevará a cabo el chancado, luego la molienda, el tamizaje para separar el mineral de acuerdo a su granulometría, el proceso de flotación con cada una de estas porciones de mineral con granulometría diferente y finalmente el análisis del concentrado obtenido con cada una de ellas.

Toma de muestras en la cancha de minerales.

Para obtener una muestra representativa de mineral, necesario para las pruebas experimentales, nos trasladamos a la cancha de minerales de la planta Mercurio, la cual está situada al sur de la ciudad de Nasca, y se dedica a la flotación de minerales sulfurados de cobre. Se escogió una volquetada de mineral sulfuroso, que a simple vista contenía calcopirita, bornita, covelina, entre otros sulfuros y una pequeña cantidad de óxidos de cobre.

Los trozos de minerales eran de diversos tamaños e irregulares por lo que fue necesario romper con la comba algunos trozos para reducir su tamaño y poder con la pala tomar pequeñas muestras de diferentes partes de ese mineral incluyendo material de diversa granulometría. De esta manera se logró reunir un total de 100 kg de mineral sulfuroso pesado en bolsas de rafia de 10 kg cada una. Las bolsas fueron selladas y remitidas al laboratorio metalúrgico.

Chancado del mineral.

Ya en el laboratorio se procedió a abrir las bolsas y su contenido se vació en una superficie de cemento debidamente limpiada y lo suficientemente grada como para poder después manipular el mineral para uniformizar su granulometría. Después de separar los trozos de mayor tamaño, se procedió a tamizar el mineral en malla #10, separando el material con un diámetro mayor a esta malla, el cual se destinó al chancado en la chancadora de laboratorio.

La chancadora de laboratorio es de quijadas 2¼” x 3½” que acepta mineral de alimentación de un diámetro entre 2 y 3 pulgadas y lo reduce a un diámetro de 3,175 mm, por lo que hay que tamizar el producto del chancado con la malla #10 y las partículas de mayor diámetro se vuelven a chancar hasta que todo el mineral seleccionado como muestra pase a través de la malla #10, requerido para someterlo a molienda.

El material chancado se recibe en baldes de 10 litros e inmediatamente se lleva a tamizaje a malla -10 y el mineral que tiene mayor diámetro se vuelve a chancar. El tamizaje se hace con varias mallas #10 a fin de que esta operación se realice lo más rápido posible. El mineral chancado que pasa por la malla #10 se va acumulando al centro de la superficie de cemento de tal forma que se vaya formando un cono a partir del cual con las palas se debe mezclar escrupulosamente a fin de que todo el mineral obtenido tenga en todo su volumen una misma composición química.

Molienda del mineral

Una vez chancado el mineral, se procedió a molerlo en un molino de bolas de laboratorio el cual fue cargado con los medios moledores de diferente diámetro con el fin de lograr una óptima molienda. Se emplearon las suficientes bolas para ocupar el 45 % del volumen del molino, el tamaño y número de las bolas fueron los siguientes: de 4,0 cm (24), de 3,45 cm (21), de 3,0 cm (24), lo cual corresponde a 50, 30 y 20% respectivamente. Se ha comprobado en múltiples ensayos de laboratorio que el empleo de bolas de diferentes diámetros permite una mejor molienda, disminuyendo el tiempo de residencia del mineral en el molino.

Primeramente, se realizaron pruebas preliminares de molienda de con muestras de un kilogramo de mineral, se programaron ensayos a diferentes tiempos de molienda: 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos, 25 minutos y 30 minutos. La finalidad de estos es establecer el tiempo requerido para lograr el 80 % del pasante a malla -200. Una vez establecido este dato se procedió a moler un total de 60 kg de mineral durante 20 minutos, que es el tiempo que permite la recuperación de un 80% de pasante. Estos 60 Kg fueron tamizados en una serie de tamices que estaban ordenadas desde la malla #100 hasta la #400 de la siguiente manera:

TABLA 2.1

Tamices para clasificar la granulometría del material

US MALLA	PULGADAS	MICRONES	MILÍMETROS
100	0,0059	149	0,149
120	0,0049	125	0,125
140	0,0041	105	0,105
170	0,0035	88	0,088
200	0,0029	74	0,074
230	0,0024	63	0,063
270	0,0021	53	0,053
325	0,0017	44	0,044

400	0,0015	37	0,037
-----	--------	----	-------

Fuente: Datos tomados de Sun Power Thermoelectrics SL (2020)

Con cada malla se tamizó la cantidad necesaria de mineral para obtener 1 kg de muestra, de tal forma que finalmente se obtuvieron un total de nueve muestras de diversas granulometrías.

La molienda se realizó en seco, esto con el fin de suprimir ciertas operaciones que necesariamente se tendrían que llevar a cabo si la molienda fuera húmeda, tales como el secado y la pulverización subsiguiente, con el inconveniente de que la pulverización va a requerir un nuevo tamizaje, para separar partículas que no corresponden a esa malla y volver a pulverizar.

Las muestras correspondientes a cada malla se almacenaron en bolsas plásticas debidamente rotuladas para no confundirlas y luego se procedió a la flotación de cada una de ellas.

Ensayos de velocidad de corrosión.

MÉTODO DE PÉRDIDA DE PESO

El método de pérdida de peso relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales. Las pruebas de inmersión total que emplean el método de pérdida de peso consisten en exponer piezas pequeñas de metal a ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de las pruebas (NACE, 1984).

Este método es uno de los más usados en estudios de oxidación y corrosión para determinar el grado de afectación en los metales. Esto se debe a que los resultados obtenidos por este método son considerados confiables, al asemejarse a resultados obtenidos en pruebas de en planta; si se cuidan las condiciones al realizar las pruebas (Perry & Green, 2003). Las pruebas de corrosión mediante el método de pérdida de peso se consideran el método más rápido y satisfactorio para hacer una selección preliminar de los mejores materiales en estudio para una determinada aplicación (Roberge, 2000)

Existen diferentes aparatos para determinar la velocidad de corrosión mediante este método. Los aparatos que determinan de forma continua el peso del testigo son muy populares en academia para realizar estudios de corrosión (Lai, 1990). Lo anterior se debe a que pueden recopilarse datos de la cinética de la reacción. Por otro lado, la principal desventaja es que sólo una muestra o testigo puede ser analizado en cada corrida, lo cual hace que el generar datos comparativos para varios tipos de sistemas y materiales sea un proceso largo.

Procedimientos y recomendaciones para realizar pruebas de corrosión en laboratorio por método de pérdida de peso.

Preparación de la superficie

Cuando se realizan pruebas de corrosión para predecir el comportamiento de un metal en un determinado ambiente, lo deseable sería que la superficie de los testigos asemejara a la de los materiales empleados en los procesos o servicios. Sin embargo, debido a que existen diferentes condiciones en los metales empleados en ingeniería es grande, incluso dentro de un mismo tipo, no sería práctico evaluar cada una de dichas condiciones (Lai, 1990). Por ello el mejor procedimiento en la práctica es elegir una determinada condición de superficie para los testigos que pueda ser reproducida a lo largo de las pruebas.

Adicionalmente, es recomendable que la superficie de los testigos no presente raspaduras ya que estos sitios representan sitios de ataque preferencial (Sheler et. al, 1995). Se pueden esperar resultados con mayor uniformidad, si se retira una capa significativa de la superficie del metal, con el fin de eliminar las raspaduras o variaciones en las condiciones de la superficie metálica original. Lo anterior se puede lograr mediante tratamiento químico, eliminación electrolítica o esmerilado con un paño o papel de liga fuerte (Perry y Green, 2003).

En cuanto a las dimensiones y forma de los testigos no existe una estándar. El tamaño y la forma de estos varían de acuerdo a la finalidad de la prueba, la naturaleza del material y el equipo que se utilice. A pesar de ello, se recomienda que en las dimensiones de los testigos exista una relación grande de superficie a masa y una relación pequeña de área del borde con respecto al área total (Sheler et. al, 1995).

Después de la manufactura de los testigos y el acondicionamiento de los testigos es necesario realizar su limpieza antes de ser empleados en las pruebas. Los testigos se deben desengrasar para remover cualquier suciedad, aceite o grasa que pueda interferir en las pruebas de corrosión. Esto se puede lograr mediante el pulido con polvo limpiador, seguido por el enjuagado completo en un disolvente apropiado, pudiendo ser acetona, metanol, por mencionar algunos. Otro de los cuidados que debe darse a los testigos es el colocarlos en un desecador hasta el comienzo de las pruebas en caso de no emplearlos de forma inmediata (Perry y Green, 2003).

Marcado de los testigos para identificación

La forma más simple para identificar a los testigos es marcarlos con letras o números. El marcado puede realizarse mediante estampado con un estencil o sello. Además, si se realiza la prueba a un gran número de testigos, se aconseja tener un historial de la posición relativa entre ellos o en el dispositivo de soporte que se emplee para realizar las pruebas. (Sheler, Jarman, y Burstein, 1995)

Volumen de la solución

El volumen empleado de solución a estudiar es un aspecto que se debe considerar al realizar las pruebas de corrosión. Es recomendable que el volumen sea lo suficientemente

grande para evitar cambios apreciables de corrosión a causa del agotamiento de los constituyentes corrosivos o a la acumulación de productos de corrosión que pudieran afectar el avance de la misma.

La Norma ASTM G31-03 recomienda que la relación de volumen de la disolución con el área de exposición de testigos sea de 40 cm³/cm² (ASTM, 2003). Otra porción es adecuada de dicha relación es de 20 cm³ de solución por cm² de superficie de la muestra. Dicha recomendación corresponde a la norma A262 ASTM para el ensayo de Huey (Perry y Green, 2003).

Número de testigos

En algunos casos las recomendaciones prácticas limitan el número de testigos a emplearse en las pruebas de corrosión. Se recomienda emplear por lo menos dos testigos o cupones para evaluar la velocidad de corrosión de determinado sistema. Para efectos estadísticos, es recomendable usar al menos cinco testigos para un mismo sistema (Perry y Green, 2003).

Duración de la prueba

La duración de una prueba de corrosión está influenciada por la naturaleza del mismo y su finalidad. Los materiales que experimentan efectos de corrosión importantes no requieren de tiempos prolongados para obtener velocidades de corrosión precisas, aunque existen excepciones. La formación de películas protectoras se observa en muchos de los materiales resistentes a la corrosión. Debido a ello, el realizar ensayos cortos con este tipo de materiales puede arrojar resultados no muy precisos de velocidad de corrosión. De forma general, se recomienda que la duración de las pruebas sea prolongada para obtener datos más reales que los que se pudieran obtener en pruebas cortas.

Si las velocidades de corrosión esperadas son bajas o moderadas, se puede emplear la Ecuación 2, para calcular el tiempo de duración de las pruebas (Sheler et. al, 1995).

Duración de la prueba (h) = 78,74 / Velocidad de la corrosión (mmy)

Donde: 78.74 es una constante de ajuste de unidades y mmy corresponde a milímetros por año.

Uno de los procedimientos que se pueden llevar a cabo para evaluar el efecto del tiempo sobre la corrosión del metal, y la corrosividad del ambiente, en las pruebas de laboratorio es la técnica de ensayo de intervalo temporal predefinido. Existen otros métodos para determinar la duración de la prueba; sin embargo, estos requieren la remoción de los productos sólidos de corrosión y no miden con exactitud las variaciones normales del fenómeno durante el tiempo.

Limpieza de las muestras después de las pruebas

Al finalizar las pruebas de corrosión es importante realizar una inspección visual de la apariencia de los testigos. En las observaciones, se deben considerar la formación de productos de corrosión, así como la deposición de dichos productos en los testigos. Lo anterior, con el fin de evaluar la corrosión localizada, por picaduras o el ataque en celdas de concentración que se puedan presentar en la superficie de los testigos. Realizada la inspección visual, los testigos deben ser sometidos a un procedimiento de limpieza.

La limpieza de los testigos posterior a las pruebas es uno de los procedimientos de mayor importancia en el desarrollo experimental de las pruebas de corrosión. De forma general, el procedimiento de limpieza debe retirar todos los productos de corrosión de los testigos con una eliminación mínima de la superficie no atacada. Si la limpieza no se realiza adecuadamente, los resultados de velocidad de corrosión pueden resultar erróneos.

No existen reglas fijas para la forma en que se debe realizar la limpieza de los testigos después de las pruebas, los procedimientos varían dependiendo el tipo de metal y el grado de adherencia de los productos de corrosión. Existen tres tipos principales de limpieza de testigos:

- Limpieza mecánica: Este tipo de limpieza remueve los productos de corrosión mediante procedimientos mecánicos. Entre dichos procedimientos se encuentra el raspado, cepillado, desbaste, el choque mecánico y el ultrasonido. El método más empleado en este tipo de limpieza es cepillar la superficie de los testigos con abrasivo suave. Los otros métodos se emplean como complemento.
- Limpieza química: La limpieza química implica la eliminación de material de la superficie de los testigos por disolución con algún agente químico apropiado. De forma general, se emplean disolventes como acetona, tetracloruro de carbono y alcohol para eliminar restos de aceites, grasas o resinas. En la norma ASTM G31 se reportan diferentes soluciones de limpieza química dependiendo del tipo de aleación o metal.
- Limpieza electrolítica: Este tipo de limpieza se realiza después de la remoción de productos de corrosión adheridos débilmente mediante frotación. La limpieza electrolítica consiste en formar con el testigo una celda de corrosión electrolítica, a determinadas condiciones de temperatura e intensidad de corriente, y en presencia de inhibidores orgánicos. Existen diferentes métodos de limpieza electrolítica dependiendo el tipo de metal que se éste estudiando; sin embargo, uno de los métodos más útiles para una gran cantidad de metales y aleaciones se encuentra reportado en la norma ASTM G1 03.

Independientemente del tipo de tratamiento que se emplee para la limpieza de los testigos después es necesario determinar el efecto de pérdida en la superficie del metal. Para ello,

antes de la prueba de corrosión y después de la limpieza posterior a ésta, es necesario determinar la masa de los testigos con el fin de establecer la pérdida de masa.

Lista de verificación de datos importantes en las pruebas de corrosión

La siguiente lista de verificación es una guía reportada en el Manual del Ingeniero Químico (Perry y Green, 2003) para describir la información y los datos a recabar adecuados al realizar pruebas de corrosión tomada.

- Medios corrosivos y su concentración
- Volumen de la solución a estudiar
- Temperatura
- Aireación
- Agitación
- Tipo de equipo utilizado para las pruebas
- Duración de las pruebas
- Composición química o nombre comercial de los metales a evaluar
- Forma y condiciones metalúrgicas de los testigos de corrosión
- Tamaño exacto, forma y área de los testigos de corrosión
- Número de testigos de cada material y ubicación
- Método empleado para la limpieza posterior a las pruebas.
- Pérdidas de peso
- Evaluación del daño por corrosión
- Velocidad de corrosión de los testigos evaluados.

III. RESULTADOS

Tabla 3.1

Resultados del análisis químico del mineral

Componente	Concentración
Cobre (Cu), %	3,17
Molibdeno (Mo), %	0,14
Níquel (Ni), %	0,35
Zinc (Zn), %	0,73
Plomo (Pb), %	0,86
Hierro (Fe), %	2,68
Azufre (S), %	24,19

Fuente: Datos experimentales.

El reporte del análisis químico del mineral sulfuroso empleado en el estudio experimental indica que el mineral contiene en mayor porcentaje cobre (3,17%) seguido del hierro (2,68%) y azufre en un alto porcentaje que alcanza el 24,19%, otros metales se encuentran en una proporción menor al 1%.

Tabla 3.2

Resultados del análisis mineralógico del mineral

Componente	Concentración
Calcopirita, %	12,4
Pirita, %	5,6
Blenda, %	1,7
Galena, %	1,2
Covelina, %	0,9
Bornita, %	0,7
Magnetita, %	1,1
Cuarzo, %	1,3

Fuente: Datos experimentales.

El análisis mineralógico del mineral indica que este tiene un 12,4% de calcopirita, un porcentaje de 5,6% de pirita, tiene además 1,7% de blenda y 1,2% de galena, así como 1,1% de magnetita y 1,3% de cuarzo.

Tabla 3.3

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia

Duración del ensayo: 40 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	74,1250
02	74,1935	74,1536
03	73,5694	73,2111
04	74,4018	74,2795
05	74,0012	73,5042
06	74,2761	74,1423
Promedio	74,1127	73,9026
Desgaste promedio, g		0,2101

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.3 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 40 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 0,2101 g

Tabla 3.4

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia

Duración del ensayo: 80 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	74,0132
02	74,1935	74,0245
03	73,5694	73,1231
04	74,4018	74,1351
05	74,0012	73,3875
06	74,2761	74,0431
Promedio	74,1127	73,7878
Desgaste promedio, g		0,3249

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.4 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 80 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 0,3249 g

Tabla 3.5

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia

Duración del ensayo: 120 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	73,9748
02	74,1935	73,9658
03	73,5694	73,0340
04	74,4018	74,0243
05	74,0012	73,1879
06	74,2761	73,9846
Promedio	74,1127	73,6952
Desgaste promedio, g		0,4175

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.5 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 120 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 0,4175 g

Tabla 3.6
Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia
Duración del ensayo: 160 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	73,8945
02	74,1935	73,9124
03	73,5694	73,0010
04	74,4018	73,9753
05	74,0012	73,1041
06	74,2761	73,9153
Promedio	74,1127	73,6338
Desgaste promedio, g		0,4789

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.6 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 160 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 0,4789 g

Tabla 3.7
Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia
Duración del ensayo: 200 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	73,5146
02	74,1935	73,6231
03	73,5694	72,9519
04	74,4018	73,9024
05	74,0012	72,9576
06	74,2761	73,7243
Promedio	74,1127	73,4457
Desgaste promedio, g		0,6670

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.7 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 200 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 0,6670 g

Tabla 3.8
 Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia
 Duración del ensayo: 240 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	73,0427
02	74,1935	73,1426
03	73,5694	72,8673
04	74,4018	73,8469
05	74,0012	72,8864
06	74,2761	73,6134
Promedio	74,1127	73,2332
Desgaste promedio, g		0,8795

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.8 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 240 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 0,8795 g

Tabla 3.9

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia

Duración del ensayo: 280 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	72,9312
02	74,1935	72,9654
03	73,5694	72,2464
04	74,4018	73,3514
05	74,0012	72,3156
06	74,2761	73,2061
Promedio	74,1127	72,8360
Desgaste promedio, g		1,2767

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.9 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 280 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 1,2767 g

Tabla 3.10

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia

Duración del ensayo: 320 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	72,3527
02	74,1935	72,4625
03	73,5694	71,9468
04	74,4018	72,9835
05	74,0012	72,3015
06	74,2761	72,9541
Promedio	74,1127	72,5001
Desgaste promedio, g		1,6126

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.10 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 320 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 1,6126 g

Tabla 3.11

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia

Duración del ensayo: 360 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	72,0003
02	74,1935	72,0322
03	73,5694	71,5897
04	74,4018	72,6104
05	74,0012	71,9568
06	74,2761	72,6237
Promedio	74,1127	72,1355
Desgaste promedio, g		1,9772

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.11 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 360 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 1,9772 g

Tabla 3.12

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia

Duración del ensayo: 400 horas

N° de bola	Masa inicial, g	Masa final, g
01	74,2342	71,8996
02	74,1935	71,9349
03	73,5694	71,1362
04	74,4018	72,2678
05	74,0012	71,6453
06	74,2761	72,2537
Promedio	74,1127	71,8562
Desgaste promedio, g		2,2565

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.12 muestra los resultados del ensayo en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante 400 horas con agitación mecánica constante, en la cual se observa un desgaste promedio de 2,2565 g

Tabla 3.13

Variación de peso de los cuerpos molidores con relación al tiempo de residencia
(Desgaste promedio)

Tiempo de ensayo, h	Pérdida de Peso (desgaste) promedio, g
40	0,2101
80	0,3249
120	0,4175
160	0,4789
200	0,6670
240	0,8795
280	1,2767
320	1,6126
360	1,9772
400	2,2565

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.13 muestra los resultados de los ensayos en el que se sometieron las bolas del molino a pruebas de contacto con la pulpa sulfurosa preparada con una densidad de 1,4 g/mL, durante tiempos que van desde 40 horas hasta 400 horas, observándose una variación de pérdida de pesos (desgaste) que va desde 0, 2101 g a las 40 horas hasta una pérdida de peso de 2,2565 g a las 400 horas.

IV. DISCUSIÓN

Las Pruebas experimentales realizadas para demostrar la hipótesis planteada, se hicieron con un mismo mineral el mismo que contenía sulfuros de cobre, hierro, zinc y plomo, ya que el interés particular de la investigación es establecer la influencia de los sulfuros en el desgaste de las partes internas del molino de bolas por efecto del ácido que se forma en las reacciones químicas entre el sulfuro, el agua y el oxígeno, reacciones que conforme pasa el tiempo ese produce más intensamente, generando un desgaste por corrosión superficial muy intenso. En el estudio se han considerado solo las bolas, debido a que estas están hechas de acero aleado, el cual principalmente tienen hierro, manganeso y cromo, para asegurar su dureza y hacerlo resistente a la corrosión.

El acero aleado tiene cromo en porcentajes menores a los 12% (proporción que según datos técnicos es a mínima para hacer de un acero inoxidable. Pero aún cuando su proporción es menor en el acero aleado, también lo protege de la oxidación, pero no con una alta eficiencia sobre todo cuando el metal está expuesto constantemente a un medio corrosivo y la película de óxido de cromo no se puede restablecer.

Los ensayos para determinar la velocidad de corrosión se llevaron a cabo en una pulpa preparada con el mineral seleccionado, el cual primeramente se chancó, luego fue sometido a molienda en un molino de bolas de laboratorio hasta malla 150, que es la granulometría generalmente utilizada en el proceso de flotación. Con este mineral chancado se preparó la pulpa que tiene una densidad de 1,4 g/mL, la cual se coloca en un recipiente plástico (Valde) de diámetro 30 cm dentro del cual se coloca un agitador de eje flexible con el fin de darle movimiento a la pulpa y permitir que el oxígeno del aire tenga contacto con toda su masa. Una vez preparada la pulpa y acondicionado el equipo para llevar a cabo el ensayo, se colocaron dentro de él 6 bolas de molino de un diámetro de una pulgada y un peso promedio de 74 g, ya que todas las bolas seleccionadas no tienen el mismo peso, se tomó un peso promedio, pero en la tabla 3.3 se dan a conocer el peso inicial de cada una de ellas.

Las bolas seleccionadas se sometieron a las mismas pruebas, bajo las mismas condiciones, variando solamente el tiempo de ensayo: desde 40 horas hasta 400 horas, con una diferencia de 40 horas. Después de cada uno de los ensayos, las bolas son lavadas minuciosamente, secadas a temperatura ambiente hasta total eliminación del agua que pueda quedar retenida en su superficie, para luego pesarla en balanza analítica, el peso inicial menos el peso final en cada ensayo nos da el peso del material consumido durante el proceso corrosivo. La diferencia de peso determinado en cada ensayo, no indica la cantidad de material consumido por corrosión. Los resultados obtenidos nos indican que conforme aumenta el tiempo de ensayo, aumenta a cantidad de material

perdido por corrosión, en cantidades que van desde 0,2101 g hasta 2,2565 g que se consume con 400 horas de ensayo.

El cálculo de la velocidad de corrosión promedio expresado como una tasa uniforme de pérdida de masa por unidad de área por unidad de tiempo en gramos por metro cuadrado por día ($\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$) se muestra en la ecuación siguiente:

$$CR = W / (A \times T)$$

Donde:

CR es la velocidad de corrosión promedio, en gramos por metro cuadrado por día ($\text{g} + \text{m}^2 + \text{d}$),

W es la masa de la pérdida, en gramos (g)-

A es el área expuesta de la bola ensayada, en metros cuadrados (m^2) ($A = 4\pi r^2$)

T es el tiempo de exposición, en días (d)

V. CONCLUSIONES

1. Experimentalmente se ha podido determinar la velocidad de corrosión promedio de los molinos de bolas usados en la molienda húmeda de minerales sulfurosos, la cual es de 5 g/m²/día.
2. La composición química de los metales que conforman la estructura de los molinos de bolas, es cromo, hierro, manganeso, siendo el cromo el elemento que proporciona capacidad inoxidable y el manganeso el componente que proporciona dureza al acero aleado.
3. Se ha podido establecer que el comportamiento químico de los sulfuros durante la molienda del mineral con respecto a los metales con que están hechos los protectores y las bolas del molino, es la de formar ácido sulfúrico con el oxígeno del aire y el agua, lo que disminuye el pH y aumenta la corrosión.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ensayar la corrosión en un molino de bolas, considerando el proceso de molienda, pero teniendo en cuenta el gasto por desgaste que se produce durante los choques de las bolas con el mineral, el protector y las otras bolas.
2. Se recomienda utilizar un acero inoxidable de mayor resistencia para cubrir las partes internas de los molinos de bolas; este acero debería ser el AISI 316L, el cual ofrece mayores ventajas frente a diversas sustancias químicas, incluyendo los ácidos inorgánicos fuertes como el ácido sulfúrico.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.

- Astucuri, V. (2019) "Introducción a la flotación de minerales". Lima-Perú. revista del instituto de investigaciones - Fgmmcg – UNMSM volumen 2, N°3, pág. 69 – 83 julio.
- Azañero, A. (2019) "Evaluación de reactivos de flotación" Revista del Instituto de Investigación de la F.G.M.M.C.G.–U.N.M.S.M. Vol II N° 4, pág. 77-93. Diciembre. Lima Perú
- Ballester, A. (2015) "Metalurgia Extractiva" Editorial Síntesis, S.A. Madrid-España.
- Bueno, H. (2019) "Procesamiento de Minerales" Impreso en Jauja–Perú.
- Castro, S. (2018) Curso Panamericano de Metalurgia Extractiva, Programa Regional de la OEA, Departamento de Ingeniería Metalúrgica Universidad de Concepción, Fundamentos Físico Químicos de la Flotación.
- Douglas, M. (2017) "Diseño y Análisis de Experimentos", Editorial Iberoamérica, Capítulos 9, 10, 11. Páginas 270, 319 y 335.
- Gutiérrez, H. (2017) "Análisis y Diseño de Experimentos" Editorial Caz prensa Digital, S.A.México.
- Henley, K. (2019) Gold ore mineralogy and its relation metallurgical treatment minerals sc. Enc volumen 4 USA
- Jiménez R. (2020) "Tratamiento de minerales sulfurados de Cobre aurífero del yacimiento Patacancha Por flotación, Cusco.
- Linares, N. (2019) "Procesamiento de minerales" Tacna. Perú
- Salager, J. (2017) "Fundamentos De La Flotación" Universidad de los Andes- Venezuela
- Loza, M. (2019) "Concentración por el método de flotación por espumas del mineral sulfurado de Cobre- Molibdeno del proyecto las Bambas" Cusco
- Luque, B. (2019) "Tratamiento metalúrgico por flotación de minerales sulfurados del yacimiento Aurora" Cusco.
- MC Donald, H. (2018) Alluvial mining. Editorial Chapman & hall, London
- Ojeda, M. (2016) "Recuperación de metales preciosos provenientes de presa de jales" Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Quiroz, I. (2018) "Flotaciones diferenciales de sulfuros" UNI. Lima.
- Rivera, J. (2019) "Compendio de Conminución" Editorial UNMSM, Lima – Perú.
- Tobón, C. (2020) "Estudio de la Hidrofobicidad de Oro Nativo y su Efecto en la Flotación Espumante Directa" Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Materiales Medellín, Colombia
- Vargas, J. (2017) "Metalurgia del oro y la plata" segunda edición. Editorial San Marcos. Lima-Perú.

ANEXOS

EXPERIMENTAL ENSAYOS DE FLOTACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO.

Para los ensayos a nivel de laboratorio se siguió el siguiente procedimiento:

Preparación del mineral

El mineral que se va a procesar previamente se reduce en la mina hasta el tamaño de una pulgada, este mineral se reduce en el laboratorio usando un molino de rodillos de 2.2 kw, el mineral molido se pasa por un tamiz vibratorio con una abertura de 2mm que corresponde a la malla # 16, se encuarta y se homogeniza, se almacena en fundas con un peso de mineral de 2 kg. Para su uso posteriormente en la molienda

Molienda

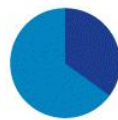
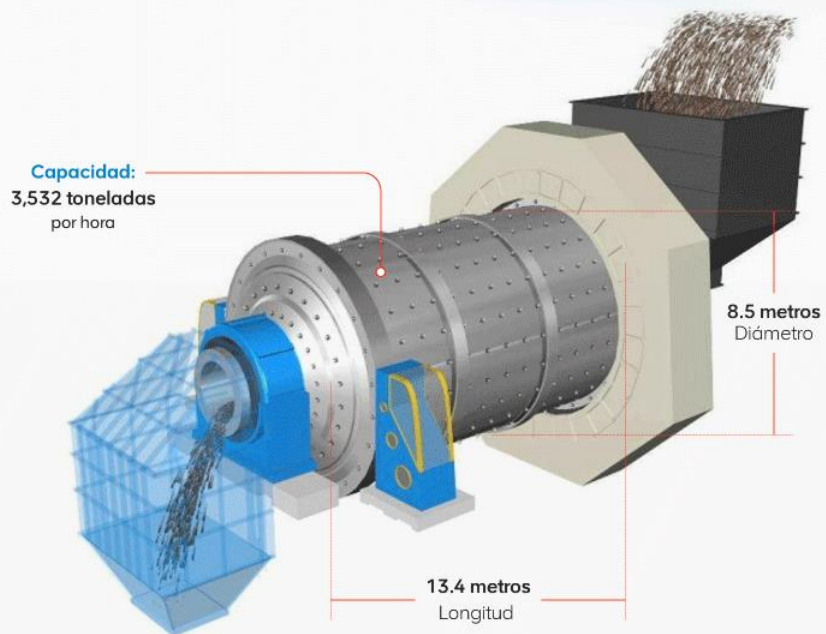
Se realiza una molienda del mineral reducido previamente y almacenado en fundas de 2 kg justo antes de la flotación para evitar la oxidación del mineral o cualquier alteración química que puede presentarse y afectar de alguna manera los resultados de los ensayos de flotación

Se coloca una carga de 10 kg de bolas de acero en un molino de bolas, se coloca 2 kg de mineral reducido 2 mm con 1.2 litros de agua para alcanzar un 62.5 % de sólidos en la molienda, se dejó moler el mineral a diferentes tiempos 20, 30, 40 min.

ENSAYOS DE FLOTACION

Los ensayos de flotación se realizan en una celda Denver (D-12) de capacidad 4 litros y con una agitación de 1600 rpm. En la flotación se realizó la variación de 7 variables de operación, como son tiempo de molienda, pH, porcentaje de sólidos, tiempo de acondicionamiento en la etapa A, cantidad de colector en el acondicionamiento A, cantidad de espumante en el acondicionamiento A, tiempo de recolección en la flotación de la etapa A, tiempo de acondicionamiento de la etapa B, cantidad de colector en la etapa B y se analiza su influencia en la recuperación de la mayor cantidad de oro en el concentrado de desbaste (concentrado A) del mineral tratado.

Características del molino de bolas



30-35%
de su interior está
cargado con bolas
de acero.



11.2 rpm
Velocidad de giro.

Fig. 20. Esquema de un molino de bolas. (Fuente: Fueyo)



Fig. 21. Bolas nuevas de molino de minerales (Fuente: Fueyo)



Fig. 22. Bolas corroídas de Molino de minerales (Fuente: Fueyo)



Fig. 23. Bolas de Molino con corrosion intensiva (Fuente: Fueyo)

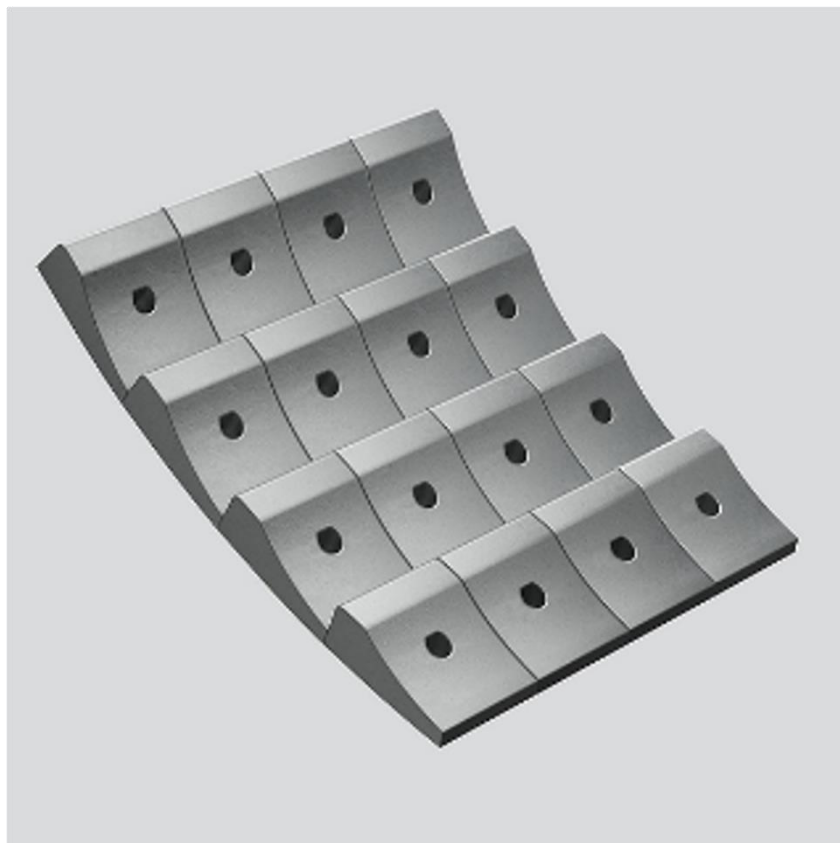


Fig. 24. Protectores interiors del Molino de bolas (Fuente: Fueyo)