

# Evaluación electroquímica de nuevos inhibidores de corrosión para molienda de minerales con agua de mar

## Electrochemical evaluation of new corrosion inhibitors for mineral grinding with seawater

Francisca Rojas, Braulio Fernández, Luis Magne, Gerardo Cifuentes y Belén Garrido  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.  
[francisca.rojasb@usach.cl](mailto:francisca.rojasb@usach.cl)

### Resumen

---

En las plantas de procesamiento de minerales los medios de molienda, como bolas y barras, son fabricadas de acero; en molienda húmeda, su consumo normalmente es elevado debido a las componentes corrosivas del medio en que se efectúa, lo que provoca que el acero sea clasificado como un insumo crítico dentro del proceso. Es importante investigar cómo evitar o minimizar el impacto económico por consumo de acero en los medios de molienda, para ello se evaluaron electroquímicamente 3 inhibidores de corrosión orgánicos por voltametría lineal y utilizando la aproximación de Tafel, para medir corrientes y potenciales de corrosión. Fueron utilizadas soluciones de agua de mar con diferentes concentraciones de los inhibidores, para pH natural del agua de mar y pH de 9,5. El inhibidor que presenta los mejores resultados bajo las diferentes condiciones de pH y concentración es el inhibidor 3, con pérdidas de espesor promedio de 0,36 mm/año a pH natural y 0,7 mm/año a pH 9,5.

**Palabras Clave:** Corrosión; inhibidores; bolas; molienda; agua de mar.

### Abstract

---

In mineral processing plants the grinding media, such as balls and rods, are made of steel. In wet grinding, its consumption is usually high due to the corrosive components of the grinding medium, therefore steel is classified as a critical input within the process. It is important to investigate how to avoid or minimize the economic impact by consumption of steel in grinding media. For this end, three organic corrosion inhibitors were electrochemically evaluated by linear voltametry and Tafel approximation. Seawater solutions with different concentrations of inhibitors were used for natural seawater pH and pH 9.5. The inhibitor that presents best results under the different conditions of pH and concentration is inhibitor 3, with a loss of average thickness of 0.36 mm/year at natural pH and 0.7 mm/year at pH 9.5.

**Keywords:** Corrosion; inhibitors; balls; grinding; seawater.

## Introducción

El alto costo que representan las bolas de molien- da dentro de una planta de procesamiento de mi- nerales hace de este insumo un punto crítico de la minería chilena. A nivel nacional, el consumo de acero, como medio de molien- da, es de 486.900 toneladas al año con un aumento anual, pronostican- do para el 2028 un alza del 4,7%.

En molien- da húmeda, el consumo de acero es muy alta debido a las componentes corrosivas del medio. Existe la coincidencia entre muchos inves- tigadores que existe un efecto sinérgico entre la corrosión y sollicitaciones mecánicas a las que son sometidos los medios moledores. Aunque resulta difícil separar la contribución de cada uno de los efectos sobre los medios de molien- da al consumo global.

En molinos de laboratorio, la corrosión puede re- presentar de un 25 a 75% de la pérdida del metal dependiendo de los factores mineral – metal – am- bientales, involucrados. Mientras que, en molinos industriales con alimentación continua y de gran tamaño, el consumo de acero por corrosión repre- senta menos del 10% (Remark y Wick, 1976; Nata- rajan *et al.*, 1984; Rajagopal e Iwasaki, 1992).

La molien- da húmeda reúne todos los elementos necesarios para la corrosión, como: la gran área superficial de los medios de molien- da, además de un área aún mayor de mineral molido, cuyo poten- cial electroquímico en las partículas es más noble (cátodo) que el acero de los medios de molien- da (ánodo) y, además, la abrasión continua que elimi- na cualquier partícula protectora que se haya for- mado en la superficie de los medios de molien- da (Gangopadhyay y Moore, 1985). Además, el des- gaste abrasivo produce nuevas superficies listas

para sufrir corrosión y considerando que los dife- rentes mecanismos de abrasión eliminan cualquier producto de corrosión.

Existen diversos factores que influyen en la co- rrosión al interior de la cámara de molien- da, entre ellos se encuentran el pH, presencia de iones clo- ruro y/o sulfato, cantidad de oxígeno disuelto y la presencia de aditivos necesarios para la etapa de flotación. El desgaste por corrosión aumenta cuan- do el mineral tratado contiene conductores, como, calcopirita, pirita, calcosina y pirrotita (Gangopad- hyay y Moore, 1985).

Iwasaki, *et.al.* 1998; propuso un modelo de corro- sión para los medios de molien- da, que involucra dos tipos de celdas galvánicas, como se observa en la Figura N° 1. En la celda diferencial galvánica, la superficie erosionada actúa como ánodo, mien- tras que la superficie no erosionada actúa como cátodo, y las reacciones de corrosión correspon- dientes son de oxidación de hierro en la primera área y de reducción de oxígeno en la segunda. El segundo modelo implica interacción galvánica entre el mineral y medio de molien- da. Las partícu- las minerales, principalmente sulfuros de cobre, actúan como cátodos y el acero de los medios de molien- da como ánodos, y este acoplamiento galvá- nico acelera el desgaste.

Las siguientes reacciones electroquímicas están previstas cuando los medios moledores son de acero o hierro fundido (Fontana, 1987; Natarajan, 1995).

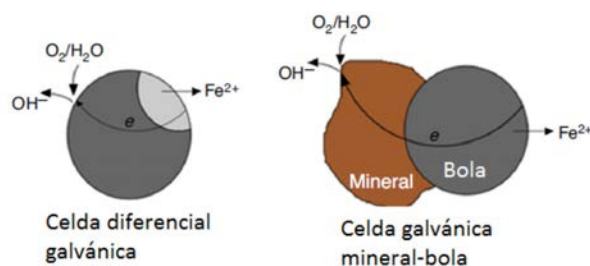
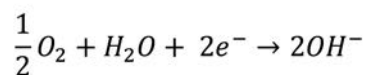
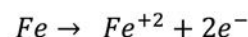


Figura N° 1. Modelos de corrosión de medios de molien- da. Fun- dido (Iwasaki *et al.*, 1998).

El revestimiento de óxido o hidróxido formado, ge- neralmente, no es adherente ni resistente a la abra- sión y se desgasta fácilmente, permitiendo una reacción química adicional. En las bolas de acero aleadas, el óxido de cromo y películas de hidróxido formadas son más resistentes a la abrasión que las de hierro. Sin embargo, incluso el alto contenido de cromo no es capaz de proteger completamente los grados de acero inoxidable cuyas tasas de des- gaste pueden ser iguales a la de acero al carbono (Natarajan, 1995).

## Agua de mar en procesos mineros

La escasez hídrica y su creciente demanda ha afectado diversos sectores productivos, entre ellos el sector minero, ya que gran parte de las faenas se ubican en regiones con los mayores déficits hídricos. Bajo estas condiciones, las compañías mineras han desarrollado tecnologías para el uso eficiente de este recurso, entre ellas, y por la condición geográfica del país, es la utilización de agua de mar en los procesos mineros (Cochilco, 2017). Existen dos posibilidades para esto, desalinizar el agua y/o usar directamente agua de mar. El consumo de agua marina es de 5,1 m<sup>3</sup>/s actualmente aumentado a 11,2 m<sup>3</sup>/s para 2028, según pronósticos. En el 2027, se espera que el 90% del agua proveniente del océano será destinada al tratamiento de sulfuros.

La salinidad está constituida por las sales disueltas en el cuerpo de agua, en este caso el océano. En la Tabla N° 1 se muestra la composición iónica del agua marina con su respectiva concentración.

La salinidad es parte de los diversos factores que aceleran la corrosión del acero por agua de mar debido al alto contenido del ion cloruro, provocando un aumento en la conductividad del electrolito y favoreciendo la corrosión. Al momento de analizar el efecto de la salinidad en la velocidad de corrosión, es importante tener en cuenta su influencia en el contenido de oxígeno disuelto puesto que la velocidad de corrosión está gobernada por el acceso del oxígeno a la superficie metálica.

Especie iónica	Concentración, ppm, mm · kg <sup>-1</sup>	Parte de la salinidad, %
Cloruro, Cl <sup>-</sup>	19345	55,030
Sodio, Na <sup>+</sup>	10755	30,590
Sulfato, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2701	7,680
Magnesio, Mg <sup>2+</sup>	1295	3,680
Calcio, Ca <sup>2+</sup>	416	1,180
Potasio, K <sup>+</sup>	390	1,110
Bicarbonato, CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	145	0,410
Bromuro, Br <sup>-</sup>	66	0,190
borato, BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	27	0,080
Estroncio, Sr <sup>2+</sup>	13	0,040
Fluoruro, F <sup>-</sup>	1	0,003

Tabla N° 1. Composición iónica del agua de mar (Anthoni, 2006).

La salinidad oceánica depende de la profundidad, la que a su vez afecta otras propiedades como la cantidad de oxígeno disuelto, pH, temperatura, entre otros. Si bien la temperatura varía en función de la época del año y del lugar, un aumento de esta variable genera un alza en la velocidad de corrosión en materiales metálicos.

Y, por último, la existencia de organismos animales o vegetales que están en el agua de mar, y la putrefacción de la materia orgánica también es considerada como una de las principales causas de la corrosión acelerada en este medio; la existencia de iones sulfuros ha demostrado ser nociva para la mayoría de los metales y las aleaciones.

## Inhibidores de corrosión

Se pueden distinguir cuatro tipos de inhibidores de corrosión: pasivadores o anódicos, catódicos, formadores de precipitados y orgánicos (Bradford, 1993).

Los inhibidores orgánicos solubles formaran un film por adsorción, el cual es de unas pocas moléculas de espesor e invisible. En cambio, el film formado por inhibidores insolubles puede llegar a constituir un espesor importante y visible. Estos films tienen una buena persistencia, lo que implica que su acción de inhibir es por un tiempo prolongado (Hackerman, 1947).

Los inhibidores orgánicos se pueden adsorber de forma física, debido a las fuerzas electrostáticas entre los iones orgánicos y la superficie del metal cargada eléctricamente; y química, donde existe transferencia de cargas durante la adsorción, siendo un proceso lento necesitando una fuerte energía de activación.

Esta investigación tiene por objetivo estudiar la corrosión electroquímica de las bolas de acero en agua de mar con diferentes inhibidores y comparar la eficiencia de estos. Los inhibidores para evaluar en este estudio son los del tipo orgánicos, estos se caracterizan por afectar la superficie completa del metal que se corroe, por lo cual, no pueden ser desintegrados al contrario de lo que ocurre con los inhibidores catódicos o anódicos.

## Procedimiento Experimental

Se realizaron 20 ensayos en total utilizando soluciones compuestas por agua de mar e inhibidores de corrosión, a pH natural y pH de 9,5. En la Tabla N° 2 se detallan las diferentes soluciones a ensayar, especificando el inhibidor, su concentración en base de 1 tonelada de agua de mar y el pH.

Para cumplir con los objetivos planteados, se desarrollaron dos tipos de pruebas, detalladas a continuación:

- Curvas de potencial – corriente transientes de voltametría lineal para la determinación de la cinética de corrosión.
- Curvas de potencial corriente del tipo Tafel, para la determinación del potencial y corriente de corrosión y así estimar la pérdida de espesor por corrosión generalizada.

Inhibidor	Concentración, g · ton <sup>-1</sup>	pH	
S / I <sup>1</sup>	-	Natural	
1	40		
	80		
	100		
2	40		
	80		
	100		
3	40		
	80		
	100		
S / I	-		9,5
1	40		
	80		
	100		
2	40		
	80		
	100		
3	40		
	80		
	100		
<sup>1</sup> Sin Inhibidor			

Tabla N° 2. Caracterización de las soluciones a utilizar para los diferentes ensayos.

Estas experiencias se realizaron utilizando un electrodo de referencia de sulfato cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>), cuyo potencial referido al hidrógeno es de 340 mV a 25°C.

## Resultados y discusiones

Se espera que los aditivos generen una inhibición total o parcial de la corrosión de las bolas de mollienda en el medio ácido en el que trabajan.

En la Figura N° 2 se visualizan las corrientes de corrosión y la pérdida de espesor para los diferentes inhibidores en función de su concentración a pH natural, al comparar la cinética de corrosión del acero en una solución de agua de mar sin inhibidor y con 40 g/ton de inhibidor 1, resultan tener un comportamiento muy similar entre sí, sin presentar una gran variación en la corriente de corrosión ni mucho menos en la pérdida de espesor en el acero.

Por otra parte, se observa que los inhibidores 1 y 2 no presentan una tendencia clara con el aumento de la concentración del reactivo, ya que a 80 g/ton se produce un alza de la cinética de corrosión para el inhibidor 1 con una densidad de corriente que aumenta de 0,21 a 0,325 mA/cm<sup>2</sup>, mientras que para el inhibidor 2 disminuye la cinética de corrosión de 0,13 a 0,08 mA/cm<sup>2</sup>. Al contrario, el inhibidor 3 presenta un comportamiento esperado en que al aumentar la concentración del inhibidor se genera una disminución de la cinética de corrosión, disminuyendo la corriente desde 0,12 mA/cm<sup>2</sup> a 0,04 mA/cm<sup>2</sup>.

Al modificar el pH a 9,5, se tiene que la cinética de corrosión aumenta en un 48%. y la pérdida de espesor del acero aumenta en 2,63 mm/año, en soluciones sin inhibidor.

En la Figura N° 3 se muestra el comportamiento de los inhibidores frente a la corrosión del acero cuando se trabaja a pH mayores al pH natural del agua. En general, se observa una tendencia de disminución en la cinética de corrosión junto con la pérdida de espesor del material para todos los inhibidores. Sin embargo, el inhibidor 1 presenta un comportamiento oscilante mostrando un pick para la concentración de 80 g/ton, análogo a lo ocurrido en soluciones a pH natural, donde la cinética de corrosión resulta ser mayor que para las concentraciones de 40 y 100 g/ton.

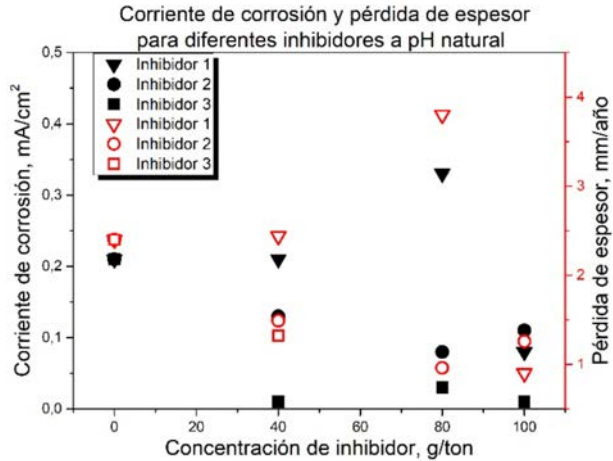


Figura N° 2. Corriente de corrosión, mA/cm<sup>2</sup>, y pérdida de espesor, mm/año; para un acero en función de la concentración del inhibidor, g/ton; para diferentes inhibidores a pH natural.

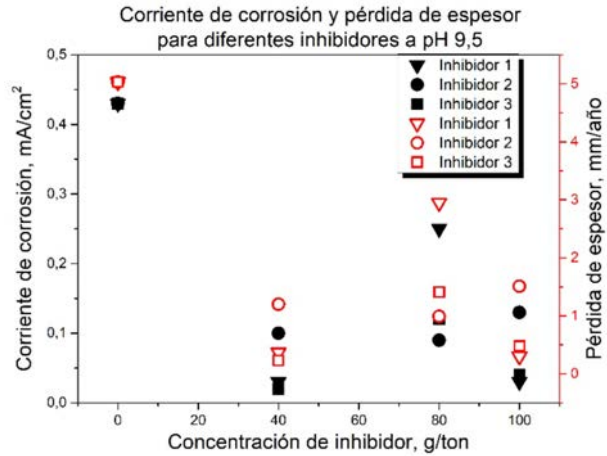


Figura N° 3. Corriente de corrosión, mA/cm<sup>2</sup>, y pérdida de espesor, mm/año; para un acero en función de la concentración del inhibidor, g/ton; para diferentes inhibidores a pH 9,5.

De las Figura N° 2 y Figura N° 3 se puede concluir que para las tres concentraciones utilizadas del inhibidor 1 las cinéticas de corrosión son menores cuanto se aumenta el pH disminuyendo un 85,71% para 40 g/ton; 24,24% a 80 g/ton del inhibidor y, finalmente, para la concentración de 100 g/ton la cinética de corrosión disminuyó en un 62,5%.

Para el inhibidor 2, al modificar el pH desde natural a 9,5; la cinética de corrosión se ve levemente aumentada en las tres concentraciones utilizadas.

En la Figura N° 4 se muestra el potencial de corrosión en función de la concentración de los diferentes inhibidores utilizados a pH natural, se puede visualizar que, en general, los inhibidores promue-

ven un aumento del potencial de corrosión previendo el consumo del acero de las bolas de molinenda. En el caso del inhibidor 1 con una concentración de 80 g/ton el sistema es mayormente propenso a la corrosión que la solución sin inhibidor, al igual que el inhibidor 3 a 100 g/ton, aunque es menor medida. Sin embargo, este último es quien presenta una mejor protección contra la corrosión en cuanto a potencial cuando es utilizado a 40 g/ton de concentración con un aumento de 107,4 puntos en voltaje con respecto al sistema sin inhibidor.

Cuando se aumenta el pH a 9,5 la protección contra la corrosión decae para todos los inhibidores en todas sus concentraciones, desplazando el potencial a valores menores en comparación con el

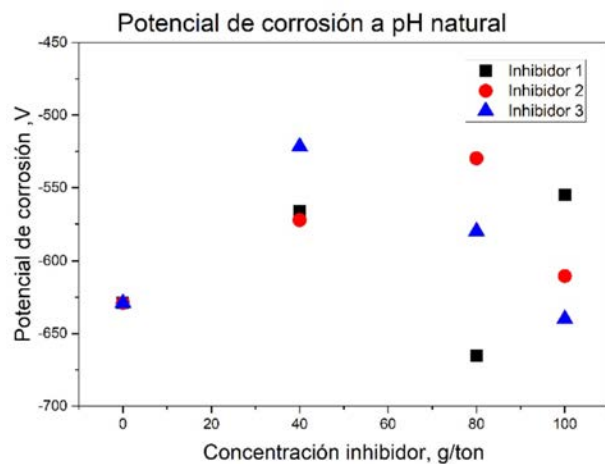


Figura N° 4. Potencial de corrosión utilizando diferentes inhibidores en función de su concentración a pH natural.

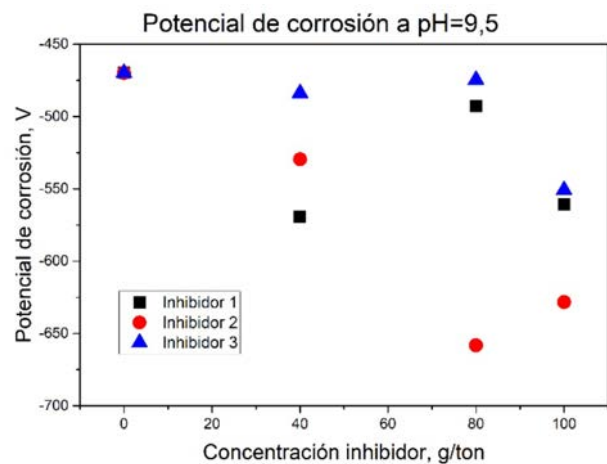


Figura N° 5. Potencial de corrosión utilizando diferentes inhibidores en función de su concentración a pH de 9,5.

potencial del sistema sin inhibidor. Esto puede ser visualizado en la Figura N° 5, donde la condición menos favorable ocurre con el inhibidor 2 a una concentración de 80 g/ton alcanzando potenciales de -658,2 V; y el inhibidor con menor variación de potencial fue el inhibidor 3 en todas sus concentraciones.

## Conclusiones

A pH natural, la susceptibilidad de corrosión disminuye a medida que aumenta el número del inhibidor, es decir inhibidor 1, 2 y 3. Mientras a pH 9,5, la susceptibilidad de corrosión disminuye en el orden de inhibidor 2, 1 y 3.

El aumento de concentración del inhibidor no asegura la disminución en la susceptibilidad a corro-

sión, ya que para el inhibidor 1 y 3 las mayores susceptibilidades se presentan para la concentración de 80 g/ton. Mientras que el inhibidor 2 presenta sus menores cinéticas de corrosión para 80 g/ton.

El inhibidor más afectado por el aumento del pH es el 2, seguido por el inhibidor 1. Siendo el menos afectado el inhibidor 3.

El inhibidor que presenta los mejores resultados bajo las diferentes condiciones de pH y concentración es el inhibidor 3.

## Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero para esta investigación a la Corporación de Fomento de la Producción bajo el proyecto CORFO 16CONTEC-67392. Y a la Universidad de Santiago de Chile (USACH).

## Referencias

Remark JF, Wick OJ. 1976. Corrosion control in ball and rod mills. Paper No. 121, Corrosion/76, NACE, Houston, Texas, USA.

Natarajan KA, Riemer SC, Iwasaki L. 1984. Corrosive and Erosive Wear in Magnetic Taconite Grinding," Preprint No. 83-602, SME-AIME Annual Meeting, Atlanta, Georgia, USA.

Rajagopal V, Iwasaki I. 1992. The properties and performance of cast iron grinding media. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 11: 75-106.  
<https://doi.org/10.1080/08827509208914215>

Gangopadhyay AK, Moore JJ. 1985. The role of abrasion and corrosion in grinding media wear. *Wear* 104: 49-64.  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90245-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90245-5)

Iwasaki I, Pozzo RL, Natarajan KA, Adam K, Orlich JN. 1988. Nature of corrosive and abrasive wear in ball mill grinding. *International Journal of Mineral Processing* 22: 345-360

Natarajan KA. 1995. Laboratory studies on ball wear in the grinding of a chalcopyrite ore. *International Journal of Mineral Processing* 46: 205-213.  
[https://doi.org/10.1016/0301-7516\(95\)00093-3](https://doi.org/10.1016/0301-7516(95)00093-3)

Fontana MG, Greene ND. 1987. *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, New York, USA.

Cochilco. 2017. Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre. <https://www.cochilco.cl>

Anthoni FJ. 2006. Seafriends: discover what it takes to save the sea, the environment, the world. <http://www.seafriends.org.nz/issues/war/intro.htm>

Bradford SA. 1993. *Corrosion Control*. Chapter: Corrosion Inhibitors, Springer, Germany.

Hackerman N. 1948. Use of inhibitors in corrosion control. *Corrosion: The journal of science & engineering*, 4: 45-60.  
<https://doi.org/10.5006/0010-9312-4.2.45>