

# DESGASTE DE MINERODUCTOS

## POR ACCIÓN DE PULPA MINERAL A DIFERENTES VALORES DE PH

Benjamín A. Lagos Berrios, Gonzalo S. Reyes Donoso

### INTRODUCCIÓN

En la minería, uno de los métodos para transportar el mineral desde la mina a la planta de procesamiento es en forma de pulpa (mineral molido y mezclado con agua) por medio de mineroductos. Tal es el caso de la mina Los Bronces ubicada al norte de Santiago, la cual envía el material a la planta de procesamiento Las Tórtolas a través de un ducto de 56 km. La vida útil de estos mineroductos se ve profundamente afectada por la acción de la pulpa que se transporta. En particular, la pulpa desgasta el acero usado para la construcción de los mineroductos a través de mecanismos de corrosión y abrasión.

El objetivo de este estudio es comparar la respuesta de diferentes aceros sometidos al desgaste de una pulpa mineral en diferentes valores de pH para estimar las condiciones de mayor y menor desgaste con el objeto de obtener condiciones óptimas de operación en mineroductos. Los cuatro materiales estudiados son un acero estructural A36, un acero estructural de alta resistencia XABO<sup>®</sup>500 utilizado en fabricación de tuberías, un acero antibrasivo XAR<sup>®</sup> PLUS y una placa bimetálica, estos últimos, diseñados para tener una buena respuesta al desgaste.

### EXPERIMENTACIÓN

Para comparar el desgaste en los diferentes aceros seguimos el procedimiento descrito por la norma ASTM G75 [1]; usamos una máquina especialmente diseñada que desgasta pequeñas probetas (muestras de acero de dimensiones dadas) y se miden diferencias de masa antes y después de cada ensayo de desgaste para determinar el número SAR (Slurry Abrasion Response [1]), número adimensional que caracteriza el desgaste. La máquina, llamada máquina Miller [2], consta de cuatro carriles donde se deposita la pulpa y de cuatro brazos

donde se colocan las probetas, la que permite realizar dos ensayos de desgaste a la vez (Figura 1).

Cada sesión (que incluye 3 ensayos) tiene una duración de ocho horas, tomando en cuenta todos los preparativos necesarios y el tiempo de funcionamiento del equipo. Al comienzo de la sesión se inspeccionan las probetas para revisar que no se encuentren sucias, para que no se vea afectado el resultado final, ya que el siguiente paso es pesarlas con una precisión de 0,01 mg. Luego se montan las piezas de



Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica

**Benjamín A. Lagos, Gonzalo S. Reyes:** ex-alumnos del curso "Daño de materiales por acción del medio ambiente" impartido por la profesora M. Walczak.

Contacto: Magdalena Walczak - mwalczak@ing.puc.cl

acero en la máquina, en la cual se deposita la pulpa mineral en los cuatro carriles, se enciende la máquina y se deja durante 1 hora y 44 minutos (duración de un ensayo). Luego se limpian las piezas minuciosamente (proceso que incluye el uso de un limpiador ultrasonido). Finalmente, se registra el peso de las piezas. Este mismo procedimiento se repite dos veces para obtener los datos suficientes para determinar el número SAR para cada material desgastado con la pulpa a un pH determinado.

El número SAR obtenido corresponde a una medida de la respuesta de diferentes materiales a la abrasividad de diferentes pulpas. Con él se puede comparar el rendimiento de varios materiales expuestos a una misma pulpa. Para esta investigación el pH original de la pulpa fue 8,4 y fue ajustado a otros valores utilizando ácido sulfúrico e hidróxido de sodio. Para complementar el estudio se hizo un análisis de las probetas de acero en el microscopio electrónico de barrido de la facultad de Física (UC) el cual entregó imágenes de la superficie de las probetas desgastadas, para observar los mecanismos de abrasión; mapas de composición química, los cuales muestran en la superficie la distribución de los elementos atómicos que componen la muestra analizada, como una imagen en tonos de grises; y el porcentaje de composición atómica, que entrega la distribución de elementos atómicos en porcentajes.



Figura 1: Máquina Miller, aparato usado para el desgaste de las muestras de acero

Se puede optimizar el mantenimiento de mineroductos, aumentando la predictibilidad de su funcionamiento frente a cambios de parámetros de la pulpa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, como principal resultado se muestra el gráfico de comparación entre los materiales, uno para comparar la pérdida de masa con pH a través del número SAR (Figura 2) y el otro para comparar la pérdida de masa con la dureza (Brinell HB) (Figura 3). En estos gráficos es posible observar un patrón de comportamiento para cada material a medida que se varían los valores de pH. Todos los materiales sufren su máximo y mínimo desgaste a los pH 9,7 y 6,5, respectivamente. Para los valores de pH que producen mayor abrasión (8,4 y 9,7 según la Figura 2) se observa que las mínimas tasas de desgaste ocurren en el material con mayor dureza. Para el valor de pH 6,5 no se observan mayores diferencias

en desgaste entre los materiales que tienen mayor y menor dureza.

En general los aceros están compuestos fundamentalmente por Hierro (Fe) y Carbono (C) entre otros elementos. Por su parte el desgaste en aceros ocurre de manera mecánica, remoción de material producida por el impacto con las partículas que componen la pulpa, y/o química, por la corrosión que produce una disolución de iones de Fe ( $Fe^{2+}$  o  $HFeO_2^-$ ) en el medio acuoso lo que implica una pérdida de masa. Desde el punto de vista químico, los resultados obtenidos son posibles de explicar teóricamente a través del diagrama Pourbaix (explicado en la sección de Principio Científico) del Fe en medio acuoso que

Especie	$G_{(298K)}^0 J \cdot mol^{-1}$ (Energía libre de Gibbs)
$Fe^{2+}$	-92200
$Fe(OH)_2$	-493000
$Fe(OH)_3$	-714000

Tabla 1: Energía libre de Gibbs de algunas especies relacionadas a la corrosión del hierro en medio acuoso

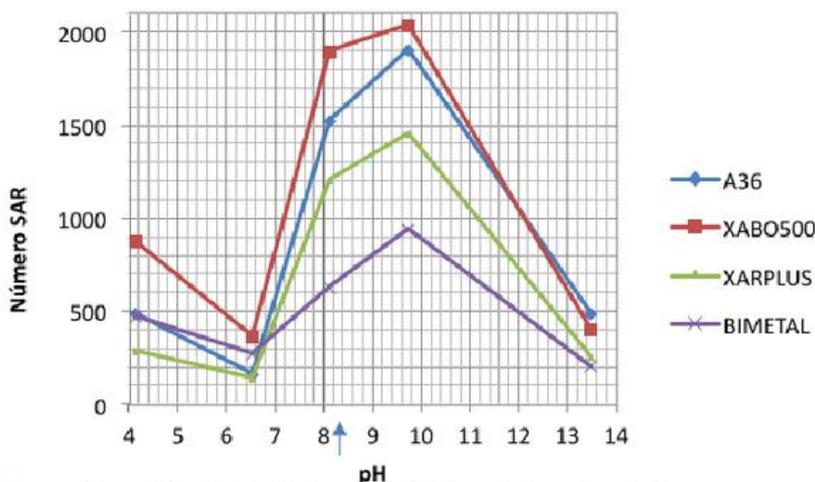


Figura 2: Número SAR en función de la dureza Brinell (HB) para distintos valores de pH

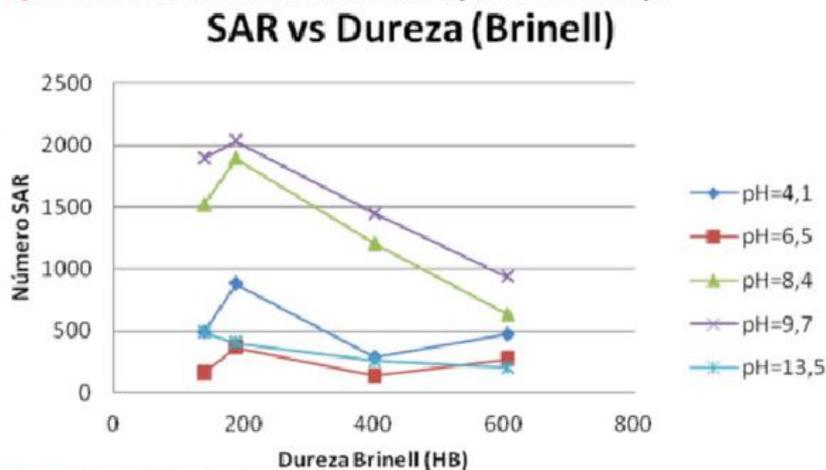


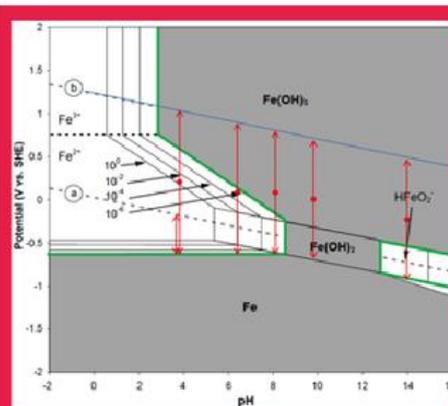
Figura 3: Número SAR en función del pH del acero

establece rangos de pH y potencial (energía asociada a reacciones electroquímicas) de las reacciones donde es posible predecir la existencia de corrosión. Además, teniendo en cuenta la energía libre de Gibbs de las distintas especies que interactúan ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), es posible distinguir dentro del mismo diagrama o más bien explicar por qué bajo ciertas condiciones es más fácil que se forme una u otra especie. Cuando la energía libre de Gibbs es menor que cero, indica que la formación de una especie ocurre de forma espontánea y entre más negativo sea este valor, la reacción tendrá un carácter más espontáneo. Ya que el diagrama Pourbaix muestra resultados la formación de especies de Fe para distintas concentraciones de Fe iónico en el medio acuoso, elegimos la de menor concentración (línea verde del diagrama) ya que, si bien la abrasión remueve partículas de hierro, estas no son diluidas en el agua y, de hacerlo, no aumenta significativamente la concentración. Por otro lado, el análisis de la pulpa mostró que esta no contenía grandes cantidades de hierro lo que valida el usar la menor concentración de Fe. Observando el diagrama de Pourbaix a pH 4 y dada la fuerza electromotriz de la reacción (potencial tomado del promedio entre el límite de estabilidad superior del agua - línea b del diagrama - y el potencial de equilibrio del Fe), nos encontramos en una zona de corrosión ya que la fuerza motriz de la reacción genera  $\text{Fe}^{2+}$ , lo cual entrega una tasa de desgaste mayor que para el pH neutro 6,5 (Figura 2). Las fotos de las muestras desgastadas en medio ácido lo corroboran. A pH 6,5 el sistema está dentro de la zona de corrosión (zona blanca del diagrama de Pourbaix) pero con una fuerza motriz menor, esto genera menores tasas de corrosión ya que una menor fuerza motriz implica menor velocidad en la reacción que genera  $\text{Fe}^{2+}$  lo cual explica la menor tasa de desgaste en comparación con el pH más bajo. A pH 8,4 el sistema está en una zona de pasividad (zona gris del diagrama, excepto la zona de Fe que es de inmunidad) ya que tenemos la formación de una capa de hidróxido de hierro en su forma  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , que protege de la corrosión y la cual tiene una mayor espontaneidad de formación que el  $\text{Fe}^{2+}$  dado que la energía libre de Gibbs asociada es menor (según la Tabla 1). Por su parte Esto explicaría el aumento en la tasa de desgaste la cual no alcanza a ser la máxima tasa debido a que antes de llegar a la

formación del hidróxido de hierro, se forma  $\text{Fe}^{2+}$ . A pH 9,7 encontramos el máximo de pérdida de masa, lo cual ocurre debido a la formación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , junto con  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , los cuales tienen una alta espontaneidad (sus energías libres de Gibbs son muy negativas). La formación de esas especies en la superficie del hierro crea una capa pasiva que protege de la corrosión pero, al haber abrasión, esta capa es removida y generada nuevamente lo que explicaría (junto con la alta espontaneidad de la formación) las máximas tasas de desgaste encontradas. Para pH 8,4 la tasa de desgaste no llega a ser la máxima debido a que antes de llegar a la formación del hidróxido de hierro, se forma  $\text{Fe}^{2+}$  el que al tener menor espontaneidad baja un poco la tasa de pérdida de masa. La formación de esas especies en la superficie del hierro crea una capa pasiva que protege de la corrosión pero, al haber abrasión, esta capa es removida y generada nuevamente lo que explicaría (junto con la alta espontaneidad de la formación) la máxima tasa de desgaste encontrada.

## CONCLUSIONES

Considerando una mayor resistencia a la abrasión como un menor valor del número SAR (Slurry Abrasion Response) tenemos que en comparación al acero estructural corriente A36, el acero antiabrasivo XAR<sup>®</sup> PLUS efectivamente tiene más resistencia a la abrasión, sobre todo en pH 13,5 y pH 4,1, siendo hasta 2 veces más resistente. Por su parte, el acero estructural de alta resistencia XABO<sup>®</sup> 500 presenta un rendimiento similar al acero estándar A36 frente a la abrasión. Comparando la placa bimetalica con el acero antiabrasivo XAR<sup>®</sup> PLUS, este último tiene hasta 2 veces mayor resistencia para pH 4,1 y 6,5, y una resistencia más baja en pHs más altos.



Para los pH de alto desgaste (8,4 y 9,7) una mayor dureza del material conlleva una menor tasa de desgaste. Sin embargo a pH 6,5 este factor no es relevante.

A pH 9,7 se forma una capa de hidróxidos de hierro (protectora anticorrosiva o también llamada pasivadora) la cual es retirada fácilmente por la abrasión, lo cual genera mayores tasas de desgaste.

Finalmente, el pH 8,4 original de la pulpa entrega tasas de desgaste mayores que a un pH neutro, por lo que se recomienda ajustar el pH de la pulpa a un valor neutral (6,5-7,0) para alargar la vida útil de los mineroductos.

## AGRADECIMIENTOS

Nuestros agradecimientos a la profesora Magdalena Walczak, por darnos la oportunidad de hacer este trabajo y a la vez ser nuestra guía, su motivación, y la experiencia que nos entregó; al Sr. Emmanoel Lima representante de ThyssenKrupp Aceros y Servicios quienes nos facilitaron los aceros y el soporte de las demás pruebas; a Anglo-American, por facilitarnos la pulpa mineral con la cual desgastamos los aceros; y finalmente al Sr. Patricio Pérez, por su tiempo en el laboratorio de materiales.

## REFERENCIAS

1. ASTM Standard G75, 2007, "Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)", ASM International, West Conshohocken, Pa, 2007, DOI: 10.1520/G0075-07, www.astm.org
2. LOBO, Sebastián. Manual Operativo Máquina de desgaste tipo Miller. Laboratorio de Metalurgia PUC, 2010 (referencia interna).

### Principio Científico

"El Diagrama de Pourbaix es una representación gráfica del equilibrio de las diferentes fases formadas en un sistema electroquímico acuoso en función de un potencial y pH. En estos diagramas se distinguen zonas de corrosión (Las cuales marcamos en color blanco), de inmunidad y pasivación (estas dos últimas están marcadas en color gris). La zona de pasivación consiste en la formación de una capa protectora que impide que el material se siga oxidando. Al interpretar estos gráficos es posible decir si cierto metal se corroerá o no bajo ciertas condiciones de pH y concentración."