

## EMPLEO DE SENSORES ELECTROQUÍMICO PARA DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE CORROSION IN-SITU EN POZOS DE AGUA

### Employment of electrochemical sensors for determination of in-situ corrosion rate in wells water

#### RESUMEN

Se justifica el uso de la técnica electroquímica de Rp como una alternativa para ser empleada en monitoreos de agua de pozo in situ con la finalidad de determinar la cinética de corrosión; proporcionándose una metodología para poder realizar monitoreos mediante celdas electroquímicas. Puesto que la técnica tradicional para poder llevar a cabo estos estudios es la prueba gravimétrica se expusieron cupones en el interior del pozo de agua durante un año. Una vez concluida la exposición de dichos cupones se compararon los resultados obtenidos con la técnica gravimétrica con los resultados obtenidos mediante la técnica de Rp.

**PALABRAS CLAVES:** Monitoreo, Pozos, Pruebas Gravimétricas, Rp, Sensores Electroquímicos.

#### ABSTRACT

The use of the electrochemical technique of Rp is justified as an alternative to be an employee in well water monitorings in situ with the purpose to determine the kinetic corrosion; being provided a methodology for be able to carry out monitorings by means of electrochemical cells. Since the traditional technique to be able to carry out these studies is the gravimetric test were exposed coupons in the interior of the well during a year. Once it concluded the coupons exposition were compared the results obtained with the gravimetric technical with the results obtained by means of the technique of Rp.

**KEYWORDS:** Monitoring, Wells, Gravimetric Tests, Rp, Electrochemical Sensors.

#### VICTOR OROZCO CARMONA

Ingeniero Mecánico, M. Sc.  
Técnico Titular  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S.C.  
victor.orozco@cimav.edu.mx

#### FACUNDO ALMERAYA C.

Ingeniero Metalúrgico, Ph. D.  
Investigador Titular C  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S.C.  
facundo.almeraya@cimav.edu.mx

#### CITLALLI GAONA TIBURCIO

Ingeniero Metalúrgico, Ph. D.  
Investigador Titular B  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S.C.  
citlalli.gaona@cimav.edu.mx

#### ADÁN BORUNDA TERRAZAS

Ingeniero Metalúrgico, M. Sc.  
Técnico Titular  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S.C.  
[adan.borunda@cimav.edu.mx](mailto:adan.borunda@cimav.edu.mx)

#### A. MARTÍNEZ VILLAFANE

Licenciatura en Física y  
Matemáticas, Ph. D.  
Investigador Titular D  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S.C.  
martinez.villafane@cimav.edu.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

Los metales inmersos o parcialmente inmersos en agua tienden a corroerse debido a su inestabilidad termodinámica. El agua natural contiene sólidos disueltos, gases y en algunas ocasiones materia coloidal o suspendida, lo cual puede afectar las propiedades corrosivas del agua en relación con el metal con el cual entra en contacto. El efecto puede ser por un lado estimulante y por el otro de supresión, pudiendo afectar la reacción catódica o anódica. Algunos metales forman de manera natural una película protectora en el agua y la corrosividad de ésta depende en si la materia disuelta permite mantener dicha película protectora [1].

Fecha de Recepción: Mayo 24 del 2007  
Fecha de Aceptación: Agosto 28 del 2007

Los metales comúnmente empleados en sistemas de agua son el hierro y acero. Estos metales presentan algunos tipos de recubrimientos protectores; el acero galvanizado, por ejemplo, presenta una pequeña película de zinc, el cual es un ánodo con respecto al acero excepto en alta temperatura. Muchos sistemas sin embargo, contienen una gran variedad de otros metales y el efecto de los constituyentes del agua deberán ser considerados. Los más usuales son el cobre, latón, bronce, plomo, aluminio, aceros inoxidables y soldaduras.

El paso de agua natural a través de tuberías puede modificar la composición del agua y por lo tanto sus

propiedades corrosivas. El consumo de algunos constituyentes que bajo condiciones normales son corrosivos, por ejemplo el oxígeno o el dióxido de carbono, pueden reducir las propiedades de corrosividad del agua. Por otra parte la disolución de metales en el agua pueden hacerla mucho más corrosiva. Un ejemplo de lo anterior es el ataque de algunos tipos de agua sobre el cobre y el subsecuente incremento de corrosión por picaduras de metales más nobles como el hierro, el acero galvanizado y el aluminio. Esto puede ser debido a que el incremento en las picaduras es a causa de una redepositación de una mínima cantidad de cobre sobre metales más nobles y así formar numerosas celdas de corrosión bimetálica [2].

La falla en los metales puede ser el más importante efecto del agua corrosiva, sin embargo otro efecto puede surgir de pequeñas concentraciones de iones metálicos producidos por corrosión. El agua natural en ocasiones pasa a través de tuberías de plomo pudiendo obtener una concentración en la toxicidad debido al metal; con el cobre lo anterior es tolerable desde el punto de vista toxicidad pero el manchado en fábricas y sanitarios puede ser un problema. Con el acero, similarmente, la decoloración del agua puede ser desagradable pudiendo provocar daños en materiales previamente procesados.

La concentración de varias sustancia disueltas en el agua, en forma coloidal o suspendida son relativamente bajas pero varían considerablemente, por ejemplo una dureza de 300-400 ppm en algunas ocasiones el tolerable en suministro público, mientras que el hierro disuelto en una cantidad de 1 ppm es inaceptable.

Los más importantes constituyentes del agua pueden ser clasificados de la siguiente manera:

1. Gases disueltos (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, amoníaco, gases sulfurosos).
2. Constituyentes minerales, incluyendo sales que influyen en la dureza, sales de sodio (cloruros, sulfatos, nitratos, bicarbonatos, etc), sales de metales pesados y sílica.
3. Materia orgánica, incluyendo de origen animal y vegetal, aceites, constituyentes de desechos industriales (incluyendo agrícolas) y detergentes sintéticos.
4. Formas microbiológicas, incluyendo varios tipos de algas y bacterias

En función de los argumentos presentados, es de suma importancia la buena selección de los materiales a ser empleado en sistema de agua de pozo. Tradicionalmente la selección de los materiales se realiza mediante pruebas in situ, en las cuales metales o aleaciones (cupones) son expuestos bajo las condiciones ambientales presentes en el interior de los pozos de agua natural, dicho método es conocido como pérdida de peso [3], el cual consiste en exponer una muestra en un medio ambiente determinado,

durante un período de exposición con la finalidad de medir su degradación. Generalmente este tipo de pruebas son de largo periodo de exposición, muy específicas en cuanto a la colocación y medio ambiente, quedando la velocidad de corrosión como un valor en función del tiempo de exposición, cuya principal desventaja es el tiempo total que se requiere para obtener resultados. De aquí que en este estudio se pretende emplear técnicas electroquímicas como una alternativa para evaluar materiales bajo condiciones in situ de agua de pozo y obtener información de la cinética de corrosión en períodos mucho más cortos.

Las técnicas electroquímicas para la medición de corrosión han incrementado su popularidad, debido a la rapidez con la cual se pueden hacer las mediciones. Estudios de corrosión de largo tiempo, pueden tomar días o semanas completas, mientras que un experimento electroquímico requerirá al menos varias horas. La velocidad de las mediciones electroquímicas es especialmente útil para aquellos metales o aleaciones que son altamente resistentes a la corrosión.

Dichas técnicas electroquímicas se basan en la imposición de una perturbación al sistema en estudio y la medida de la respuesta obtenida. La medición de las variables de corriente y voltaje obtenidas por medio de alguna técnica electroquímica puede proporcionar información sobre velocidad de corrosión, comportamiento de recubrimientos y películas, pasividad, tendencias a picaduras y otros datos importantes.

## 2. CONTENIDO

### 2.1 Metodología Experimental.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de realizar pruebas electroquímicas en un sistema basado en sensores electroquímicos expuesto en un pozo de agua. Adicionalmente se expusieron cupones corrosímetro por un año en el mismo pozo de agua, para comparar los resultados obtenidos mediante técnicas electroquímicas.

Inicialmente se determinó la profundidad a la cual se introducirían los sensores electroquímicos en el pozo de agua, para garantizar que dicho sensores estuvieran totalmente inmersos en el medio a ser expuestos, siendo esta de 150 metros (ver foto 1).

Se evaluaron 6 aceros; 4 al carbono y 2 inoxidables, para lo cual, se prepararon sensores electroquímicos. La técnica electroquímica empleada fue Resistencia a la Polarización Lineal.



Foto 1. Proceso de instalación de los sensores electroquímicos en el pozo de agua.

La preparación de los sensores electroquímicos se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Los aceros a evaluar son previamente maquinados, con una geometría de acuerdo a las especificaciones de diseño (ver foto 2).
- Los especímenes son montados en sensores electroquímicos con un arreglo de tres electrodos idénticos mediante resina epóxica, para posteriormente ser preparados por la técnica de metalografía para tener superficies libre de rugosidades.
- Todos los sensores (electroquímicos) son limpiados con agua destilada, desengrasados, secados y almacenados en un desecador antes de ser evaluados electroquímicamente en el pozo de agua asignado.



Foto 2. Sensor de Corrosión (diseño de tres electrodos).

En cuanto a las pruebas gravimétricas, el estudio se basó en la Norma ASTM G1 [4], la cual, indica realizar las siguientes actividades:

- Determinar el peso de los cupones inicialmente, antes de ser expuestos al medio en donde van a ser evaluados.
- Determinar la pérdida de peso de los cupones asociada a la degradación de estos, la cual, será realizada posterior a la etapa de limpieza de los cupones
- La velocidad de corrosión promedio fue obtenida aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad de Corrosión} = (K \times W) / (A \times T \times D)$$

Donde:

K = 3.45 X 10<sup>6</sup> (para obtener la velocidad de corrosión expresada en mpy).

T = Tiempo de exposición en horas.

A = Área de exposición en cm<sup>2</sup>.

W = Pérdida de peso en gramos.

D = Densidad del material a ser evaluado en g/cm<sup>3</sup>.

Para la prueba gravimétrica se diseñó un rack portacupones, en el cual se introdujeron los cupones a ser expuesto en el interior del pozo de agua por un año (ver foto 3).

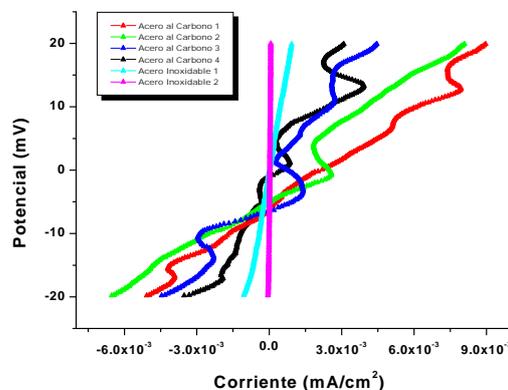


Foto 3. Proceso de instalación del rack portacupones en el pozo de agua.

## 2.2 Resultados.

### 2.2.1 Técnicas Electroquímicas

Una vez evaluado los seis sensores electroquímicos mediante la técnica Resistencia a la Polarización (Rp) se obtuvieron las siguientes Curvas Potencial vs Corriente (ver gráfica 1), dando como resultado de su análisis los valores de velocidad de corrosión mostrados en la tabla 1. Adicionalmente en esta tabla 1 se muestran los resultados obtenidos mediante la evaluación de los cupones corrosívimetros expuestos en el interior del pozo por un año.



Gráfica 1. Curvas obtenidas al aplicar la técnica electroquímica de Resistencia a la Polarización a los seis aceros en estudio.

Material	Cinética de Corrosión (mm/año)	
	Pruebas Gravimétricas	Pruebas Electroquímicas
Acero al Carbono 1	0.31275	0.10830
Acero al Carbono 2	0.28131	0.08885
Acero al Carbono 3	0.27756	0.05532
Acero al Carbono 4	0.22877	0.04265
Acero Inoxidable 1	$2.45 \times 10^{-5}$	$1.27 \times 10^{-2}$
Acero Inoxidable 2	$1.65 \times 10^{-5}$	$8.21 \times 10^{-4}$

Tabla 1. Valores cinéticos de las pruebas electroquímicas y gravimétricas.

**2.2.2 Pruebas Gravimétricas.**

En la foto 4 se puede observar, las condiciones en las cuales se encontraron los cupones después de haber sido expuestos durante 1 año en un pozo de agua, observándose la gran cantidad de productos de corrosión presentes en los cupones de acero al carbono, que a diferencia de los cupones de acero inoxidable en los cuales es mínima la cantidad de productos de corrosión.



Foto 4. Condiciones de los cupones inmediatamente después de ser retirados del pozo de agua.

En la foto 5, se muestra las condiciones superficiales de los cupones expuestos a las condiciones prevalecientes en el interior del pozo de agua durante 1 año, posterior a realizar la limpieza química propuesta en la Norma ASTM G1.



Foto 5. Condiciones finales de los cupones expuestos durante 1 año en el interior de un pozo de agua.

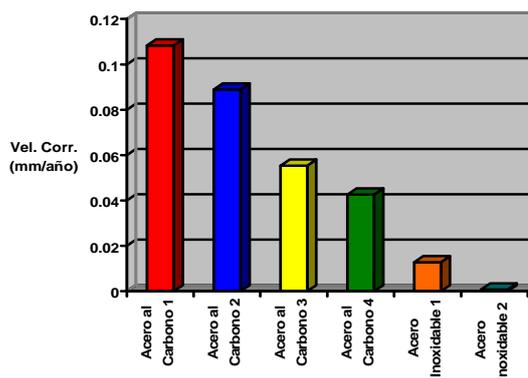
De la foto 5 se puede observar, que los aceros inoxidables no presentaron ningún tipo de degradación ha simple vista, lo cual, se reflejo en la pérdida de peso y por lo tanto en la velocidad de corrosión, siendo sus valores prácticamente despreciables (ver tabla 1).

Por otro lado, los acero al carbono presentan una morfología superficial del tipo corrosión general, este tipo de morfología nos indica que los aceros al carbono con el transcurso del tiempo de exposición han experimentado una mayor degradación.

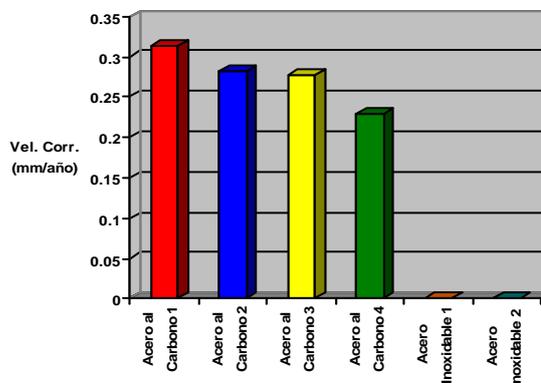
**2.2.3 Comparación: Técnica Electroquímica Rp vs Pruebas Gravimétricas**

De acuerdo con los resultados obtenidos por las pruebas electroquímicas y gravimétricas a los seis aceros expuestos en el agua de pozo (ver tabla 1), se llegan a la siguiente discusión:

Los valores de velocidad de corrosión (gráficas 2 y 3) se encuentran en el mismo orden de magnitud. Teniendo los aceros al carbono mayores velocidades de corrosión en comparación con los aceros inoxidables.



Gráfica 2. Velocidad de corrosión obtenida en los seis aceros evaluados bajo las condiciones en el interior del pozo de agua, mediante la técnica electroquímica de Rp.



Gráfica 3. Velocidad de corrosión obtenida en los seis aceros evaluados bajo las condiciones en el interior del pozo de agua, mediante pruebas gravimétricas.

Es importante observar que la tendencia que tuvieron los aceros al carbono con técnicas electroquímicas y gravimétricas es la misma, además de los valores de velocidad de corrosión que se encontraron en los mismos órdenes de magnitud, pero al emplear técnicas electroquímicas se tiene la ventaja de obtener los valores de velocidad de corrosión proyectados a un año en unas cuantas horas y, en el caso de pruebas gravimétricas hay que esperar resultados en función del tiempo de exposición.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos mediante las mediciones con técnicas electroquímicas nos permiten concluir que dichos resultados son confiables y, no es necesario esperar periodos tan largos para saber la respuesta a la corrosión de un material determinado en comparación con las pruebas gravimétricas.
- Los resultados obtenidos permiten observar que para las condiciones de experimentación empleadas en este estudio en particular, al comparar la técnica electroquímica de  $R_p$  con la técnica gravimétrica, presentan un comportamiento similar desde el punto de vista cualitativo.
- Desde el punto de vista cuantitativo, al comparar las dos técnicas ( $R_p$  y gravimétrica), no se obtuvieron valores similares de velocidad de corrosión, siendo aproximadamente 3 veces menores los valores de velocidad de corrosión obtenidos mediante la técnica electroquímica de  $R_p$  en comparación con los valores de velocidad de corrosión obtenidos mediante pruebas gravimétricas.

### N. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shreir L, Jarman R. y Burstein. Corrosion. Butterworth Heinemann. Inglaterra. 2000.
- [2] Kenworthy, L. /. Inst. Met., 69, 67. 1943,
- [3] Avila J. y Genesca J. Más allá de la Herrumbre. Fondo de Cultura Económica. México. 1996.
- [4] Norma ASTM G1. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. American Society for Testing and Materials. 1999.