

MONITOREO POR RUIDO ELECTROQUÍMICO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO EN UNA ATMÓSFERA CONTAMINADA

Guadalupe TRES¹, Roberto ARRIAGA¹, José M. MALO² y Jorge URUCHURTU²

¹Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo.10032-1000, San José, Costa Rica

²Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Palmira, Temixco 62490 Morelos, México

(Recibido abril 2001, aceptado julio 2001)

Palabras clave: técnicas electroquímicas, humedad relativa crítica, contaminantes, velocidad de corrosión, resistencia de polarización, corriente de corrosión

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados electroquímicos obtenidos mediante la técnica de ruido, contrastándolos con la resistencia de polarización y su correlación con la humedad relativa y la temperatura en una atmósfera contaminada y categorizada de acuerdo con las normas ISO. Se utilizó una probeta de corrosión atmosférica de láminas conocida como medidor de corrosión atmosférica (MECA), modificada para presentar un medio continuo entre las placas, aún con baja humedad relativa. Se encontró una buena correlación entre las técnicas electroquímicas y su relación con los parámetros meteorológicos considerados en la atmósfera contaminada.

Key words: electrochemical techniques, critical relative humidity, pollutants, corrosion rate, polarization resistance, corrosion current

ABSTRACT

This work presents electrochemical noise measurement results compared to polarization resistance results and correlated to temperature and relative humidity. The results were obtained in a categorized polluted atmosphere according to ISO Standards. A modified steel plates atmospheric corrosion probe (MECA) was used in order to obtain a continuous media between the identical plates, even at low relative humidity. Good correlation was obtained between the electrochemical techniques and the environmental parameters considered under the polluted atmosphere.

INTRODUCCIÓN

Frecuentemente las estructuras metálicas están sometidas a la acción de ambientes agresivos naturales, siendo las expuestas a la atmósfera las más abundantes y la principal causa de pérdidas por corrosión. Éstas se calculan en el 50% de las pérdidas totales por corrosión de un país y se aproximan a un total entre 4 y 6 % del producto interno bruto (PIB) (Tomashov 1966). La corrosión atmosférica es ocasionada por las altas tempera-

turas ambientales, la humedad y los agentes contaminantes agresivos de origen natural o antropogénico del medio en el que están expuestos los materiales.

En el estudio de la corrosión atmosférica, los ensayos tradicionalmente utilizados son los de exposición natural y aunque son muy precisos, por estar basados en métodos gravimétricos (Skoog y West 1986), tienen el inconveniente de ser de larga duración, ya que la corrosión atmosférica es un proceso relativamente lento. Estos métodos proporcionan sólo una velocidad promedio, relativa

al período de tiempo que tardó el ensayo, pero sin indicación alguna sobre la evolución del ataque (Barton 1976).

La excesiva duración de los ensayos y el hecho de que dentro de cada tipo de atmósfera existan numerosos factores que afectan la corrosión, que dependen de la evolución (geografía, crecimiento industrial, demografía, etc.) de la zona bajo estudio así como de la climatología (estacional y diaria) del lugar, dificultan la evaluación de validez permanente. Los ensayos naturales *in situ* valoran la agresividad de una atmósfera y se admite que se mantendrá aproximadamente constante. La cuantificación del deterioro de un metal en una atmósfera dada está determinada por la siguiente ecuación:

$$C = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i V_i$$

dónde:

C es la corrosión sufrida por el material metálico.

τ_i son los períodos de tiempo en los que progresa la corrosión atmosférica, porque el metal está mojado o porque la humedad relativa ambiental (HR) es mayor que la humedad relativa crítica ($HR_{crit.}$), considerada como 80 %.

V_i es la velocidad de corrosión correspondiente a cada período de humectación τ_i .

Estos períodos de corrosión pueden ser muy pequeños y se presentan en cualquier momento a lo largo del día, por lo que resulta útil tratar de determinar cuando aparecen ya que las técnicas gravimétricas tradicionales no lo hacen. Además la intensidad de la corrosión se incrementa con la presencia de contaminantes atmosféricos, principalmente bióxido de azufre y cloruro de sodio.

Debido a la naturaleza electroquímica de la corrosión atmosférica, resulta natural tratar de aplicar técnicas electroquímicas para evaluarla, ya que esto permite obtener mediciones, prácticamente en tiempo real y determinar así los períodos en que la corrosión es más intensa. Genescá y Ávila (1986, 1994), presentan una introducción a los temas aquí tratados, para los lectores que no están familiarizados con éstos.

Uno de los factores críticos ha sido la fabricación de dispositivos apropiados para realizar estas mediciones, ya que éstas deben realizarse en muestras metálicas, en presencia de capas de electrolito que se adsorben, precipitan o condensan en su superficie y que muchas veces son demasiado delgadas, sobre todo cuando $HR < HR_{crit.}$ (González 1989). Esto dificulta grandemente reunir todos los elementos de una celda electroquímica para realizar mediciones en la atmósfera.

Los primeros pasos en el diseño y en la utilización de monitores electroquímicos de corrosión atmosférica (MECA) fueron dados por Tomashov (1966) y Sereda (1958), pero los mayores avances se deben a investigadores noruegos y suecos (Kucera y Matson 1974, Haagenrud

1980, Kucera y Gullman 1981, Kucera *et al.* 1990) así como estadounidenses (Mansfeld y Kenkel 1976, Mansfred 1979, Mansfeld y Tsai 1980), quienes determinaron que la corriente de la celda se correlaciona con los factores climáticos, tal como lo hace la corrosión. Investigadores franceses también han desarrollado su propio diseño, haciendo mediciones mediante técnicas de impedancia y de resistencia de polarización (Fiaud y Tirbonod 1976, Fiaud y Chahrouri 1981).

Los modelos más comunes de MECA se basan en la aplicación del método de medida de la resistencia de polarización de Stern y Weisert (1959), pero de acuerdo con la modificación de March (1964), que permite prescindir del electrodo de referencia. Lo que se hace es montar láminas metálicas idénticas, separadas entre sí por otras de material aislante y que en conjunto se montan en una resina, tal como aparece en la **figura 1**; cuando se usan tres láminas y la central no se polariza, ésta puede actuar como electrodo de referencia. Con estos dispositivos es posible realizar el trazado completo de las curvas de polarización, que anteriormente era imposible (González y Otero 1984).

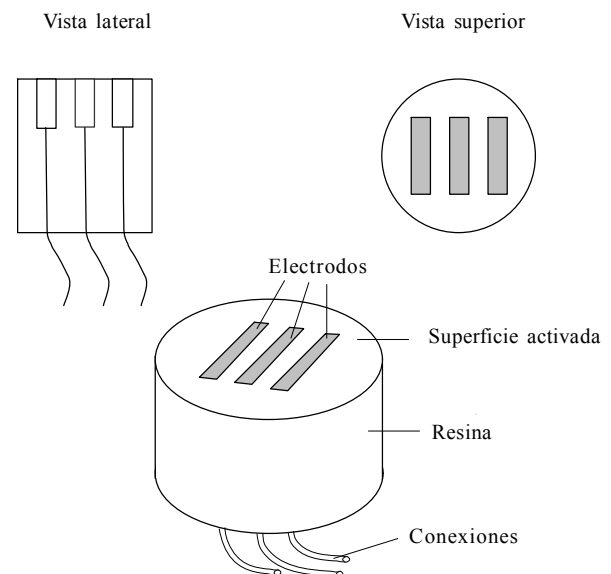


Fig. 1. Esquema de la configuración de la celda electroquímica utilizada para ensayos de monitoreo de corrosión atmosférica por métodos electroquímicos

Dentro de las técnicas más utilizadas, en el estudio de la corrosión, sobresalen la resistencia a la polarización lineal (LPR) y la impedancia. En ambas, el sistema se perturba por medio de una señal externa de voltaje directo o alterno, respectivamente, y se considera la respuesta en corriente para evaluar el comportamiento del material (Baboian 1986). Esto se logra obteniendo por analogía con la ley de Ohm, la llamada resistencia

de polarización que es inversamente proporcional a la corriente de corrosión que, mediante las leyes de Faraday, se puede transformar en pérdida o degradación del metal.

Sin embargo, una técnica alternativa a ésta y que se emplea cada vez más en la actualidad es el ruido electroquímico. En este caso el sistema no se perturba y lo que se mide son las variaciones u oscilaciones espontáneas en corriente y voltaje, producidas por las micropilas que se forman sobre la superficie del metal, que dan lugar a la cinética de reacción electroquímica durante el proceso de corrosión.

Esta técnica se ha empleado para determinar la velocidad de corrosión, calculando la resistencia de ruido R_r de manera similar al caso anterior y que ha resultado comparable a la resistencia de polarización lineal R_p (Cottis *et al.* 1996). Se ha comprobado también que los niveles de ruido electroquímico en procesos de corrosión, particularmente en la localizada, son significativamente mayores que los observados en sistemas redox (Dawson 1996), lo que ha permitido utilizar esta técnica en la caracterización y en la predicción de la corrosión localizada. A pesar de todas las ventajas y aplicaciones de la técnica de ruido electroquímico, aún no existen métodos estandarizados ni consenso total en la base teórica para la interpretación de los datos. El mejor recurso de validación en la aplicación de ruido electroquímico es utilizar otra técnica como patrón de comparación; esto es especialmente viable cuando se estudia la corrosión uniforme o la generalizada (Bertocci 1996).

El objetivo del presente trabajo es demostrar la aplicación de las técnicas electroquímicas en el monitoreo de la corrosión atmosférica, utilizando un sensor *activado* (Pat, Pend. 1997) ó MECA modificado, como se esquematiza en la **figura 2**, desarrollado para superar las limitaciones actuales de los sensores existentes, esto es para condiciones cuando la $HR < HR_{crit}$.

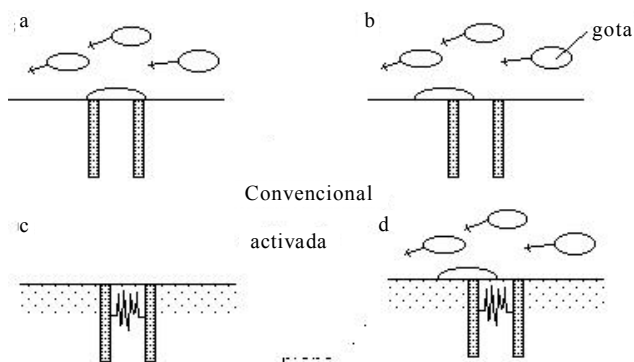


Fig. 2. Diagrama esquemático de una probeta en presencia de una gota de electrolito aproximando dos electrodos

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar la corrosión atmosférica del acero tipo 1010 en función del tiempo de exposición natural, se realizó un monitoreo electroquímico. Se preparó una probeta, según el esquema de la **figura 1**, con tres piezas idénticas del material montadas en una resina poliéster, a la que se le dió un tratamiento en una solución alcalina de NaOH a 80 °C durante una hora para que su superficie adquiriera un carácter hidrofílico, como se presenta en la **figura 2**. Las superficies fueron lijadas con papel abrasivo grado 600, pulidas con alúmina de tamaño de partícula de 10 μm y enjuagadas con agua destilada antes de iniciar la prueba.

Se investigó su comportamiento durante 48 horas, ejecutando de manera secuencial y continua las técnicas de ruido electroquímico y de resistencia de polarización lineal; para esto se utilizó un equipo modelo GILL 8 AC de la marca ACM Instruments. Los parámetros atmosféricos fueron adquiridos simultáneamente por una estación meteorológica instalada en las inmediaciones del área de exposición de la celda.

La resistencia de polarización lineal se realizó con barridos de potencial de -20 mV a 20 mV respecto al potencial natural y a una velocidad de 80 mV/min. El ruido electroquímico se obtuvo mediante la adquisición de 5120 muestras, registrando el valor de potencial y corriente a velocidad de 1 muestra/segundo, obteniendo series de potencial y de corriente en función del tiempo y calculando las desviaciones estándar promedio de cada serie.

Para determinar la resistencia en ruido se calculó la desviación estándar del ruido en corriente y voltaje de cada corrida y se aplicó la ecuación siguiente (Cottis *et al.* 1996):

$$R_r = \sigma_E / \sigma_I$$

Se permitió una pausa de 3 minutos entre cada determinación experimental de resistencia de polarización y ruido electroquímico. Las pruebas fueron realizadas en una atmósfera natural caracterizada de acuerdo con su agresividad ambiental y corrosividad bajo estándares internacionales ISO (1987, 1989). La tasa promedio de depositación de contaminantes que caracterizan a la atmósfera bajo estudio son: para el SO_2 de 4.78 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$ y para el NaCl de 12.08 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{día}$, con un tiempo de humedad relativa crítica (considerada del 80%) del 69% al año. Esta clasificación caracteriza a la atmósfera como de corrosividad media-alta de acuerdo con parámetros ambientales y de baja-media para la corrosividad del acero (Morcillo *et al.* 1999).

RESULTADOS

Comportamiento de la humedad relativa y la temperatura

Los datos de temperatura y humedad relativa durante 24 horas se presentan en la **figura 3** a partir de la hora en que se inició el monitoreo, es decir a las 4 pm. El comportamiento de la humedad relativa, mostrado en la figura, indica que aumentó a partir de 65 % durante el anochecer hasta 85 % a las 10 pm, disminuyendo ligeramente a 80 % para luego incrementar hasta 90 % durante parte de la noche y la madrugada hasta las 6 am. A partir de este momento la humedad relativa empezó a disminuir nuevamente hasta las 12 pm, donde alcanzó el valor mínimo de 60 % manteniéndose así hasta el final del monitoreo.

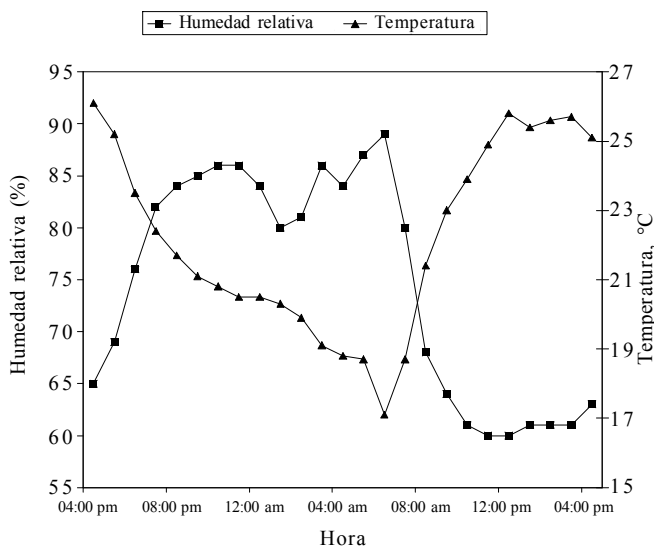


Fig. 3. Variación de la temperatura y de la humedad relativa en función del tiempo

Por otro lado, esta gráfica muestra claramente como la temperatura presentó un comportamiento inverso casi correspondiente al de la humedad relativa. La temperatura tendió a disminuir desde las 16 horas hasta las 6, en la que alcanzó el mínimo de 17 °C. Después de las 6 am, la temperatura empezó a aumentar desde los 17 °C hasta alcanzar aproximadamente 26 °C a las 12 pm, veinticuatro horas después.

Técnica de ruido electroquímico

Las **figuras 4 y 5** ilustran, como ejemplo, una serie de potencial-tiempo y de corriente-tiempo, respectivamente. Ambas señales muestran cierta correspondencia en su comportamiento. La señal de ruido electroquímico en potencial presenta oscilaciones aleatorias con algunos transitorios de hasta 20 mV sobrepuestos a la señal base,

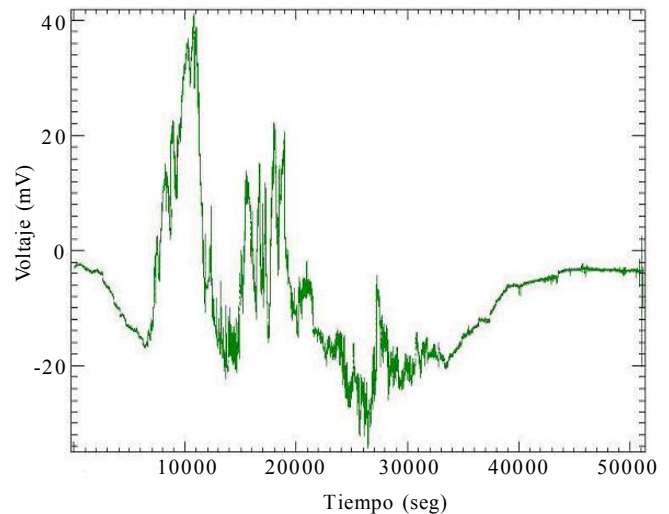


Fig. 4. Señal de ruido en voltaje durante el monitoreo de corrosión atmosférica

en la parte media del tiempo total de muestreo, disminuyendo y desapareciendo al final del período. De manera similar el ruido electroquímico en corriente exhibe oscilaciones aleatorias con una amplitud aproximada de $1\text{E-}7$ mA/cm² como señal base y transitorios de $3\text{E-}7$ mA/cm². Como se mencionó, súbitamente se presentaron transitorios a la mitad del período de muestreo volviendo a su nivel inicial al final de éste.

La resistencia de ruido R_r obtenida a través de la señal de ruido electroquímico se muestra en la **figura 6**. Al inicio del monitoreo, los valores oscilan entre 100 y 200 Mohms disminuyendo a valores de 4 Mohms después de 4 horas. Los valores permanecieron casi constantes oscilando y aumentando ligeramente a las 10 horas, volviendo a incrementar su valor a partir de las 15 horas de exposición. Este incremento observado aunque con una

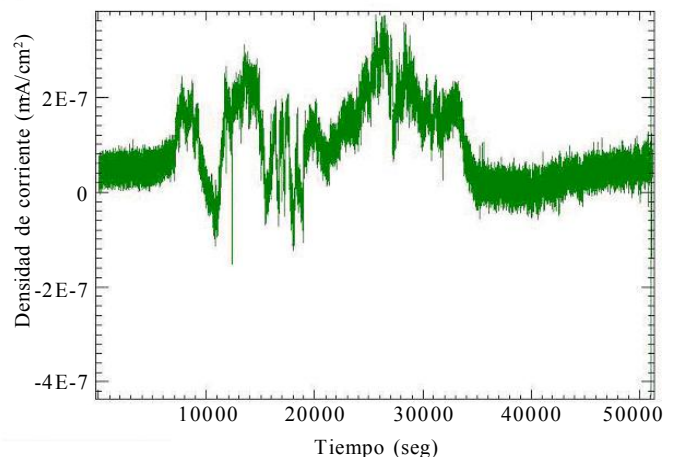


Fig. 5. Señal de ruido en corriente durante el monitoreo de corrosión atmosférica

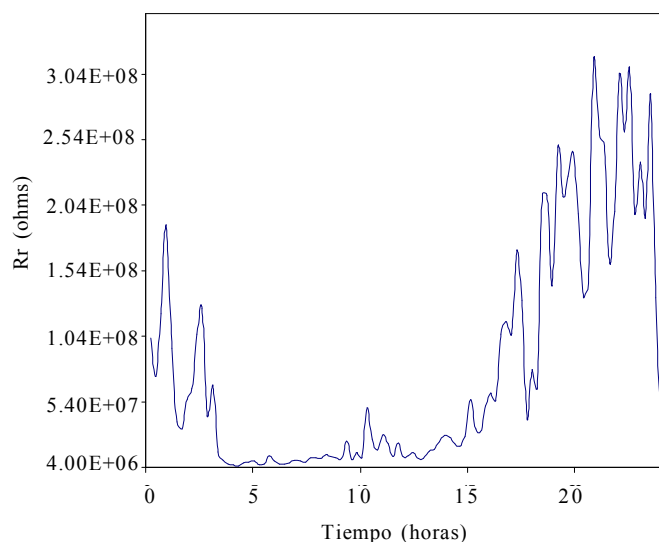


Fig. 6. Valores de resistencia de ruido del monitoreo de corrosión atmosférica del acero tipo 1010

tendencia constante presenta variaciones en sus valores, alcanzando un nivel de casi 300 Mohms al final del monitoreo.

Técnica de resistencia de polarización lineal

En la **figura 7** se presentan los resultados obtenidos de resistencia de polarización R_p correspondientes al período de monitoreo. Como puede observarse, al inicio del monitoreo el valor de R_p está por arriba de 150 Mohms, disminuyendo de manera constante hasta un valor cercano a 1 Mohm, cinco horas después. Durante 10 horas se mantiene casi constante, para incrementar y alcanzar

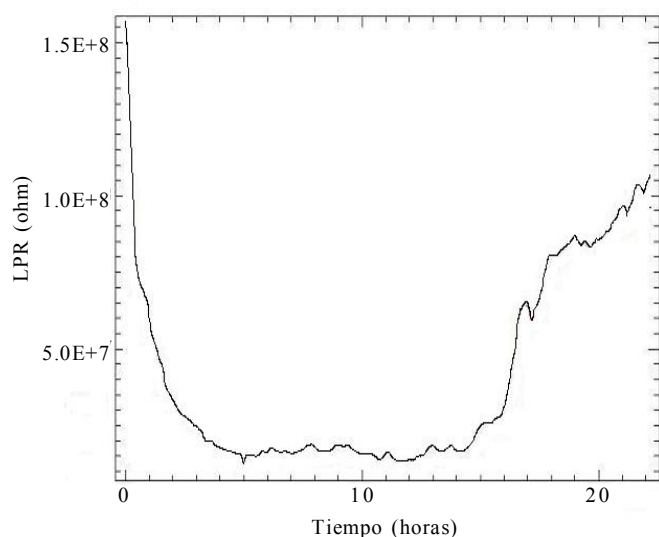


Fig. 7. Valores de R_p obtenidos por la técnica de resistencia de polarización lineal para el monitoreo de corrosión atmosférica del acero tipo 1010

al final del monitoreo un valor de 100 Mohms, veinticuatro horas después. El monitoreo se repitió al día siguiente presentándose un comportamiento muy similar en los 2 días para todos los parámetros de medición considerados.

DISCUSIÓN

La corrosión atmosférica de los metales y de las aleaciones depende de múltiples factores, como son: la naturaleza del metal, el tipo y la concentración de los contaminantes atmosféricos, el tiempo de humectación o humedad relativa crítica y el carácter más o menos protector de los productos de corrosión formados. Los ensayos tradicionales en campo son lentos y dada la naturaleza electroquímica de la corrosión atmosférica sería natural aplicar las técnicas electroquímicas para su estudio, evaluación y monitoreo.

Se han hecho esfuerzos considerables para desarrollar celdas de corrosión para aplicaciones en la atmósfera. Uno de los principales obstáculos es la necesidad de utilizar al menos dos muestras metálicas, las cuales deben estar en presencia de un electrólito (visible o no), el cual cierra el circuito eléctrico y permite la circulación de corriente iónica. Sin embargo, existen dificultades para la aplicación de estas técnicas, ya que esto no siempre acontece porque la separación entre electrodos, por pequeña que sea, usualmente no presenta un medio electrolítico continuo como se muestra en la **figura 2**. En muchas ocasiones sólo existe una monocapa debida a la adsorción, la cual puede no ser continua o bien se evapora. Las limitaciones provienen de las características de los sensores y no de las técnicas en sí.

Para superar esta limitación de las celdas atmosféricas conocidas como medidores electroquímicos de corrosión atmosférica (MECA) se desarrolló una celda, mediante un tratamiento químico que modificó las propiedades superficiales del polímero utilizado para embeber los electrodos metálicos, haciéndolo de naturaleza hidrofílica. Esto permitió que en presencia de bajas humedades relativas, aún por debajo de la humedad relativa crítica, se adsorba agua, lo que mantiene una conductividad iónica adecuada entre los dos electrodos metálicos, como se observa en la **figura 2**. Esto admite la aplicación de las técnicas electroquímicas y la obtención de mediciones como las presentadas anteriormente y que son discutidas a continuación.

Para que exista corrosión significativa desde un punto de vista práctico, se requiere de humedad relativa crítica cuyo porcentaje varía de acuerdo con el tipo de material metálico que se trate. Para el acero se considera en general un valor de 60 % (Stratman y Streckel 1990), que se presentó a lo largo de todo el monitoreo (**Fig. 3**).

La corrosión del acero se produce en presencia de humedades relativas altas, incrementándose ésta a me-

didada que la humedad relativa aumenta. Sin embargo, es también cierto que con velocidades altas de corrosión también aumenta la formación de productos de corrosión que son más o menos protectores y que desaceleran el subsecuente ataque. El proceso corrosivo determinante en el inicio de la corrosión atmosférica es la difusión del oxígeno a través de la capa de electrólito presente sobre la superficie del metal y la reacción anódica comprende la corrosión y la formación de productos, esencialmente FeOOH . En presencia de contaminantes, la cinética es incrementada aún más y se puede desarrollar el ataque localizado sobre la superficie, especialmente en presencia de cloruros.

En la **figura 3** se observa que a partir del inicio del monitoreo (4 pm) comienza a descender la temperatura, aumentando la humedad relativa hasta cerca del 90% alrededor de las 6 am. A partir de este momento y coincidiendo con la salida del sol, la temperatura aumenta y la humedad relativa desciende hasta alcanzar el 60% alrededor de las 10 am, mostrándose una gran correlación entre estos parámetros como era de esperarse. De acuerdo con esto, la corrosión del acero incrementa a medida que se aproxima la noche y la humedad relativa también aumenta. Esto es lo que sugieren ambas técnicas, de acuerdo con los resultados obtenidos de resistencia a la polarización y de ruido en función del tiempo, donde la resistencia disminuye a medida que la humedad relativa crece volviendo a aumentar al incrementarse la temperatura y disminuir la humedad relativa.

Con todo esto, si se comparan los resultados presentados en las **figuras 6 y 7**, se observa que aunque se correlacionan con los datos de humedad relativa, la resistencia de ruido obtenida mediante la técnica de ruido electroquímico muestra oscilaciones en los valores a lo largo del tiempo de exposición con respecto a los obtenidos con la técnica de R_p . Este comportamiento sugiere que la técnica de ruido electroquímico es más sensible a los cambios en la cinética de corrosión.

Esto se debe por una parte a la propia naturaleza de la técnica de ruido electroquímico, en la cual se obtienen datos segundo a segundo y por otro lado es muy sensible a la corrosión localizada que se observa en sitios discretos de la superficie metálica. Como se muestra en las **figuras 4 y 5**, que presentan series de potencial y de corriente en función del tiempo, se obtienen transitorios correspondientes que están asociados a eventos localizados de corrosión y formación de productos sobre la superficie metálica y que corresponden a incrementos de corriente y caídas de potencial acompañadas de disminución de corriente y crecimiento casi exponencial de los transitorios de potencial, hasta que aparezca un nuevo evento localizado (Uruchurtu 1991). Esta señal se ve sobrepuesta a la señal base que se observa al inicio y al final de las series de tiempo y que en el caso de la señal de corriente presenta un valor análogo al reportado en la

literatura para condiciones similares en laboratorio (Almeida y Ferreira 1998).

Suponiendo que se condense la humedad en sitios discretos de la superficie, la evolución de la corriente en ese sitio discreto puede explicarse en términos de la corrosión y formación de una película de óxidos de hierro. La corriente aumenta con el tiempo a medida que disminuye el espesor de la capa de electrólito al secarse por el aumento de temperatura facilitando la evaporación, así como la difusión del oxígeno como reacción catódica y el acceso a la superficie metálica. Posteriormente, al secarse el electrólito se reduce la corriente de corrosión y aumenta la resistencia de polarización. En la superficie se forma una capa de productos de corrosión, que mientras retenga agua mantiene una cierta actividad corrosiva. Esto puede repetirse en otros sitios discretos sobre la superficie, mostrándose en las oscilaciones observadas en la **figura 6**. De ahí la importancia de los períodos de secado en la corrosión atmosférica (Stratman y Streckel 1990).

Los elevados órdenes de magnitud de los valores de R_p y R_t indican la alta resistencia del medio y por lo tanto la sensibilidad de la técnica para efectuar mediciones bajo tales condiciones. El uso de la resina activada probablemente favorece las mediciones bajo estas condiciones porque su carácter hidrofílico asegura una capa continua de humedad entre las láminas.

De manera similar a lo anterior, se puede argumentar con respecto al comportamiento global observado en el monitoreo efectuado durante las 24 horas de exposición a la atmósfera y presentado en las **figuras 6 y 7**. Comparando con los valores de humedad relativa, mostrados en la **figura 2**, se determinó que la R_p y R_t variaron de manera inversamente proporcional a la humedad relativa y proporcionalmente con la temperatura, mostrando la importancia de la humedad relativa como el factor determinante en el avance de la corrosión.

Al aumentar la humedad relativa, R_p y R_t disminuyen proporcionalmente, incrementando la corrosión. Esta disminución es de cerca de 2 órdenes de magnitud o sea 100 veces más y la velocidad de corrosión aumenta de manera equivalente. Valores elevados de humedad relativa se observan durante la noche, manteniéndose las condiciones de corrosión, o sea bajos valores de R_p y R_t . Sin embargo, diez horas después de iniciado el monitoreo (2 am), la humedad relativa disminuye para posteriormente incrementarse más y alcanzar su nivel máximo. La temperatura responde disminuyendo su velocidad de descenso, para volverla a elevar y alcanzar el valor mínimo. Esto se reflejó en un leve incremento y oscilación en los valores de la R_p y más notoriamente R_t , que comenzaron a aumentar al incrementar la temperatura. La presencia de productos de corrosión y el proceso de secado de la capa de electrólito permiten este incremento alcanzando el mismo orden de magnitud que al inicio, aunque osci-

lando en sus valores por lo explicado anteriormente. De hecho las gráficas presentadas en las **figuras 4 y 5** corresponden a esta etapa de mayor actividad corrosiva.

En la gráfica de la **figura 6** aparecen los valores de resistencia de ruido y al comparar estos resultados con los de la **figura 7** se aprecia claramente que coinciden en el orden de magnitud; de hecho el valor promedio para el monitoreo es de $R_p = 4.05E7$ ohms para la técnica de polarización lineal y de $R_r = 4.78E7$ ohms para la de ruido electroquímico. El comportamiento de R_p y R_r obtenidas a partir de las dos técnicas, coincide en el transcurso de las horas, con el comportamiento de los parámetros atmosféricos, de acuerdo con los resultados de la **figura 2**.

La resistencia por ruido electroquímico es comparable a la R_p , por lo tanto una vez que se obtiene puede emplearse la ecuación de Stern y Weisert (1959) para calcular la velocidad de corrosión.

CONCLUSIONES

La utilización del MECA modificado permitió la adquisición de datos en un medio altamente resistente, lo cual fue favorecido por el empleo de la resina activada. Este estudio mostró que la velocidad de corrosión atmosférica, medida por la técnica de resistencia de polarización lineal y de ruido electroquímico, es similar y resultó del mismo orden de magnitud. Además, el comportamiento de R_p y R_r obtenidas por ambas técnicas coincidió en el tiempo y de acuerdo con lo esperado para períodos de mayor y menor humectación.

Aunque los resultados son muy optimistas es necesario realizar más ensayos, bajo condiciones mejor controladas, utilizando la resina activada para comprobar la reproducibilidad de los resultados logrados.

La estandarización de la metodología de técnicas electroquímicas para el estudio de la corrosión atmosférica es de gran importancia en la actualidad, porque presentan muchas ventajas, como rapidez y alta sensibilidad. En este sentido, es importante continuar con la aplicación de ruido electroquímico ya que esta técnica ha demostrado tener características muy ventajosas en el estudio de la corrosión atmosférica, especialmente su sensibilidad a cambios en la actividad de la corrosión, su capacidad de diferenciar tipos de corrosión localizada y su aplicación reciente en el monitoreo de sistemas en línea.

REFERENCIAS

- Almeida E. y Ferreira M. G. S. (1998). *Corrosao atmosférica*. INETI, Lisboa, 148 p.
- Baboian R. (1986). Electrochemical techniques for corrosion engineering. NACE, Texas, 67 p.
- Barton K. (1976). *Protection against atmospheric corrosion*. Wiley, Londres, Nueva York, 27 p.
- Bertocci U. (1996). *A comparison of electrochemical noise and impedance spectroscopy for corrosion applications*, ASTM STP 1277, Filadelfia, pp. 39-58.
- Cottis R.A., Turgoose S. y Mendoza-Flores J. (1996). *The effects of solution resistance on electrochemical noise resistance measurements*. ASTM STP 1277, Filadelfia, pp. 93-100.
- Dawson J.L. (1996). *Electrochemical noise measurement: the definitive in-situ technique for corrosion applications*. ASTM STP 1277, Filadelfia, pp. 3-35.
- Fiaud C. y Tirbonod F. (1976). Advances in corrosion protection. Met. Corros. Ind. 51, 388-391.
- Fiaud C. y Chahrouri R. (1981). Les inhibiteurs de corrosion. Proc. 8th. Int. Cong. Metall. Corr., Mainz, Vol. 1, pp. 18-23.
- Genescá J. y Avila J. (1986). *Más allá de la herrumbre*. La Ciencia desde México/9, 121, FCE, pp. 110-119.
- González J.A. y Otero E. (1984). The effects of sulphur dioxide in the corrosion of iron. Br. Corros. J. 19, 89-93.
- González J.A. (1989). *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. CENIM, Madrid, Cap V, 78 p.
- Haagenrud S. (1980). Atmospheric corrosion. Werk. und Korros. 31, 543-547.
- ISO 9224 (1987). Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres. ISO, Ginebra.
- ISO 9223 (1989). Classification of corrosivity categories of atmospheres. ISO, Ginebra.
- Kucera V. y Matsson E. (1974). *Corrosion in natural environments*. ASTM-STP 558, Filadelfia, pp. 239-241.
- Kucera V. y Gullman J. (1981). *Atmospheric corrosion*. ASTM-STP 727, Filadelfia, pp. 215-223.
- Kucera V., Coote A., Henriksen J., Knotkova D., Leygraf C. y Reinhardt U. (1990). Effects of acidifying pollutants on materials including historic and cultural monuments. Proc. 11th. Int. Corros. Cong. Vol. 5, AIM, Florencia, pp. 2.433-2.440.
- Mansfeld F. y Kenkel J. V. (1976). Electrochemical impedance spectroscopy. Corros. Sci. 16, 11-117.
- Mansfeld F. (1979). EIS evaluation of localized corrosion. Werk. und Korros. 30, 38-43.
- Mansfeld F. y Tsai S. (1980). Electrochemical evaluation of localized corrosion. Corros. Sci. 20, 853-857.
- March G. A. (1964). Electrochemical techniques for corrosion studies. Proc. 2nd. Int. Cong. Metall. Corros., Nueva York, pp. 936-938.
- Morcillo M., Almeida E., Rosales B., Uruchurtu J. y Marrocos M. (1999). *Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica, Parte I: Mapa de Iberoamérica de corrosividad atmosférica*. CYTED, Madrid, 128 p.
- Sereda P.J. (1958). ASTM Bulletin. ASTM, Filadelfia, Vol. 228, pp. 53-55.
- Skoog D. A. y West D. M. (1986). *Fundamentos de química analítica*. Interamericana, México, Cap. 6, 120 p.
- Stern M. y Weisert E. D. (1959). The measurement of corrosion

- rates. Proc. Am. Soc. Test. Mat. *59*, 1280-1285.
- Stratman M. y Streckel H. (1990). On the atmospheric corrosion of metals which are covered with thin electrolyte layers. Corros. Sci. *30*, 681-696.
- Tomashov N.D. (1966). *Theory of corrosion and protection of metals*. Collier Mc Millan, Londres, 255 p.
- Uruchurtu J. (1991). Electrochemical investigations of the activation mechanism of aluminium. Corrosion *47*, 472-477.