

Evaluación electroquímica de aceros autoprotectores en condiciones simuladas de laboratorio

Beatriz Jaramillo, Jorge Andrés Calderón, Juan Guillermo Castaño*

Grupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia, SIU, Calle 62 N° 52-59, Torre 2, Lab. 330, Medellín – Colombia.

(Recibido el 21 de octubre de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

Resumen

En las últimas décadas los aceros autoprotectores se han constituido en materiales estructurales importantes para la construcción de obras civiles, gracias a la baja velocidad de corrosión que presentan cuando se exponen a atmósferas urbanas e industriales. Las excelentes propiedades anticorrosivas de los aceros autoprotectores son atribuidas a la naturaleza y estructura de las herrumbres que se forman sobre la superficie del material cuando se tienen ciertas condiciones favorables. En este trabajo se presenta un estudio sobre las características de la herrumbre formada inicialmente en aceros autoprotectores de diferente naturaleza y diferentes condiciones de superficie, desnudo, precorroído y galvanizado, expuestos en condiciones que simulan atmósferas urbanas e industriales. El análisis se realiza mediante técnicas electroquímicas de evaluación del potencial de circuito abierto e impedancia electroquímica durante los dos primeros meses de exposición.

----- *Palabras clave:* aceros autoprotectores, corrosión atmosférica, impedancia electroquímica, potencial de electrodo

Electrochemical assessment of weathering steels under simulated laboratory conditions

Abstract

In the last decades weathering steels have become important structural materials in the construction of civil works due to their low rate of corrosion when exposed to urban and industrial atmospheres. The excellent anticorrosive properties of the weathering steels have been attributed to the nature and structure of the rust formed on the material surfaces when certain favorable conditions are present. In

* Autor de correspondencia: teléfono: 57+4+210 66 16, fax: 57+4+210 64 02, correo electrónico: jacalder@udea.edu.co (J. A. Calderón G.)

this work a study of the characteristics of the rust initially formed on weathering steels is presented. The study was performed on weathering steels of different nature and different surface conditions: nude, pre-rusted and galvanized, and exposed to conditions that simulate urban and industrial atmospheres. The analysis was carried out by means of electrochemical techniques, such as evaluation of the open-circuit potential and electrochemical impedance during the first two months of exposure.

----- *Key words:* weathering steels, atmospheric corrosion, electrochemical impedance, electrode potential.

Introducción

El acero al carbono sin protección se corroe con relativa rapidez en atmósferas urbanas, industriales y marinas, y con baja velocidad en ambientes rurales no contaminados. En una atmósfera limpia y seca la superficie del acero se oxida por vía química cubriéndose de una fina película de óxidos ferrosos-férricos. En presencia de humedad pueden formarse oxihidróxidos por vía electroquímica [1].

El efecto de pequeñas cantidades de ciertos aleantes en el mejoramiento del comportamiento anticorrosivo del acero, fue identificado en los E. U. al inicio de los años 30 y desde esa época comenzaron a utilizarse aceros con baja concentración de aleantes que, además de su buen comportamiento mecánico, ofrecían ventajas anticorrosivas que los hacían aptos para aplicaciones en vagones de trenes y similares [2]. Cuando este tipo de aceros son expuestos a la atmósfera, desarrollan en su superficie capas de óxido adherente y estable que les confieren protección ante la agresividad del ambiente. Investigaciones realizadas en la década del 60 permitieron determinar que los elementos de aleación que más influyen en la resistencia a la corrosión atmosférica de este tipo de aceros son: Cu, Ni, Cr y P, siendo el Cu el principal responsable por las bajas velocidades de corrosión encontradas [3, 4].

Una ventaja adicional de los aceros autoprotectores se relaciona con su mayor resistencia mecánica (superando a los aceros al carbono como mínimo en el 40%), asociada con una buena soldabilidad y la trabajabilidad en frío y en caliente de los aceros sin alear. Esto permite obtener piezas metálicas de igual resistencia, con menor espesor y por consiguiente menor peso; lo que se traduce en menor consumo de materiales y de energía, tanto para su fabricación como para su desplazamiento.

Esa mayor resistencia también influye en el procesamiento del metal para la obtención de las formas requeridas, pues la presencia de los aleantes hace que aunque el conformado siga siendo

convencional, las dificultades sean un poco mayores, reflejándose en los costos; de manera que en términos generales se habla de que los aceros autoprotectores son algo más costosos que los aceros estructurales no aleados (se reportan cifras entre el 3 y el 20%). Sin embargo, en muchas aplicaciones, los costos iniciales de construcción con acero autoprotector son menores que con acero al carbono pintado y, lógicamente, los de mantenimiento también son más bajos.

La corrosión atmosférica de los aceros autoprotectores sucede en su estado inicial de manera similar a la corrosión del acero al carbono. Sin embargo, disminuye considerablemente a medida que aumenta el tiempo de exposición. Las propiedades protectoras de la herrumbre formada sobre los aceros autoprotectores, denominada como *pátina*, no depende únicamente de la composición química del metal. Las condiciones de los ciclos de humectación y secado, el pH y composición del agua lluvia, así como los contaminantes atmosféricos, influyen en la calidad de la herrumbre formada [5]. Por ejemplo, algunos estudios de corrosión atmosférica de aceros autoprotectores realizados en atmósferas marina e industrial de alta agresividad han revelado velocidad de corrosión similar a la del acero al carbono, pues en estas atmósferas el acero autoprotector es incapaz de desarrollar una pátina de herrumbre protectora [6].

Es normalmente aceptado que la pátina protectora formada en la superficie del acero autoprotector es de naturaleza *dúplex*, constituida por una capa interna adherente y estable de óxidos y oxi-hidróxidos amorfos de hierro y una capa externa porosa de especies más cristalinas. La composición de estas capas de herrumbre depende fundamentalmente de las condiciones de exposición [7]. En general, la disminución de la velocidad de corrosión de los aceros autoprotectores ha sido asociada a la formación de la pátina protectora constituida por los productos de corrosión formados en las etapas iniciales de corrosión y al enriquecimiento de la superficie del acero en contacto con la pátina con sus elementos

de aleación, debido a la disolución selectiva del hierro en la matriz. El enriquecimiento superficial con los elementos de aleación puede proporcionar protección al acero a través del ennoblecimiento de la superficie con cobre o níquel, o pasivándola en el caso del cromo.

Uno de los métodos más empleados en la protección de las construcciones civiles de acero al carbono frente a la corrosión atmosférica es el galvanizado. En dicho proceso el acero es cubierto por una delgada capa de cinc, la cual lo protege de la corrosión en ambientes urbanos e industriales moderados por un periodo de tiempo que depende de la agresividad, del ambiente y del espesor de la capa de cinc. A pesar del gran auge que han tenido los aceros autoprotectores para construcciones civiles, poco se ha explorado en la posibilidad de combinar sus propiedades anticorrosivas con las del cinc, con el fin de incrementar la vida útil de las construcciones en ambientes en los cuales su desempeño no es el mejor o de aumentar el tiempo de servicio sin la necesidad de mantenimiento.

En este trabajo se presentan los resultados parciales de una investigación que tiene por objeto evaluar el comportamiento frente a la corrosión atmosférica de aceros autoprotectores con diferentes condiciones superficiales, entre ellas con galvanizado, en ambientes simulados en laboratorio. Son presentados los principales resultados obtenidos con técnicas electroquímicas y de gravimetría después de los dos primeros meses de exposición.

Procedimiento experimental

Fueron evaluadas probetas de acero ASTM A-588 y ASTM A-572, desnudo y galvanizado, y ASTM A-242 desnudo, a las cuales se les realizó caracterización química y metalográfica. Algunas de las probetas de acero ASTM A-588 fueron sometidas a un proceso de herrumbrado, previo a su exposición en cámara cebelcor. La composición química de los aceros fue evaluada mediante espectrometría de emisión atómica, en un equipo Shimadzu AA6200.

Las probetas desnudas de 10 x 5 x 1 cm, fueron preparadas mediante el siguiente procedimiento: i) limpieza mecánica con chorro de arena (sand blasting) llevándolas hasta metal blanco, ii) limpieza con jabón neutro y vigoroso lavado con cepillo de cerdas plásticas, iii) enjuague con agua, iv) enjuague con etanol y secado con aire caliente. Posteriormente, las probetas fueron pesadas en una balanza analítica con una precisión de 0,01 g; para luego ser expuestas en la cámara cebelcor.

Ensayo de herrumbrado

Las probetas de acero A-588 fueron sometidas a un proceso de herrumbrado mediante un ensayo de corrosión acelerada constituido por ciclos de inmersión-emersión, en una disolución de NaCl (1 g/L), de 24 h. Luego de 30 días de ensayo las probetas adquirieron el aspecto superficial semejante al grado C de herrumbrado de la norma ISO 8501-1.

Exposición en cámara. Probetas de aceros A-588 en estado desnudo, galvanizado y precorroído, A-572 en estado desnudo y galvanizado y de A-242 desnudo fueron sometidas a ciclos de inmersión y emersión alternas en cámara cebelcor en soluciones de $5,0 \times 10^{-5}$ M y $3,5 \times 10^{-4}$ M de Na_2SO_4 , correspondientes a las concentraciones de sulfato de aguas lluvias típicas de atmósferas urbanas e industriales, respectivamente [8]. Fue realizado un monitoreo continuo de las características de las herrumbres formadas durante la exposición mediante toma del potencial de circuito abierto (PCA) y medidas de impedancia electroquímica con un potenciostato ZAHNER IM6e haciendo barridos entre 60 kHz y 3 mHz, en el PCA. Esta última se hizo previa a la exposición en cámara, a uno y dos meses de exposición. Al cabo de dos meses se retiraron la mitad de las probetas expuestas para calcular la velocidad de corrosión por medio de análisis gravimétrico y caracterizar los productos de corrosión formados.

Resultados y discusión

Caracterización de los aceros

Los resultados de los análisis químicos realizados mediante espectroscopia de emisión atómica se

presentan en la tabla 1. Es bien conocido que los principales aleantes que influyen en la resistencia a la corrosión de los aceros autoprotectores son: Cu, Cr, Ni, P y Si [3, 4]. De acuerdo con los resultados de composición química de los aceros tanto el A-242 como el A-588 pueden ser catalogados, según la ASTM [9], como aceros de alta resistencia y baja aleación resistentes a

la corrosión atmosférica, es decir como aceros autoprotectores. Por otro lado, el acero A-572 presenta contenido de Cu prácticamente igual al mínimo requerido para los aceros autoprotectores que es de 0,2%. Es posible que ese contenido de cobre sea suficiente para garantizar buen desempeño del acero A-572 frente a la corrosión atmosférica.

Tabla 1 Composición química de los aceros evaluados

Acero	Elemento													
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	Pb	Sn	Ti	V
A 588	0,231	0,204	0,929	0,031	0,018	0,178	0,468	0,028	0,009	0,277	0,006	0,032	0,001	0,004
A 242	0,169	0,196	0,882	0,027	0,020	0,110	0,138	0,025	0,009	0,375	0,007	0,028	0,001	0,003
A 572	0,201	0,245	0,735	0,031	0,013	0,082	0,068	0,017	0,008	0,193	0,004	0,022	0,001	0,002

Velocidades de corrosión

Anteriores ensayos de corrosión de probetas planas realizadas en la cámara cebelcor indicaron velocidades de corrosión 10 veces mayores que las obtenidas durante la exposición en campo, indicando que la cámara cebelcor acelera la

corrosión de las probetas expuestas en un factor de 10 sin provocar alteraciones importantes en el mecanismo de corrosión atmosférica [10]. En la tabla 2 se muestran las velocidades de corrosión de los diferentes aceros en los ambientes evaluados, urbano e industrial, después de dos meses de exposición en cámara.

Tabla 2 Velocidad de corrosión de los aceros después de dos meses de exposición en cámara cebelcor

Muestra	Velocidad de corrosión ($\mu\text{m/año}$)	
	Ambiente urbano	Ambiente industrial
A 588 desnudo	23,5236	68,2591
A 242 desnudo	26,3769	49,4137
A 572 desnudo	24,4559	51,9907
A 588 precorroído (menos pérdida de masa después de herrumbrado)	111,2475 (73,8201)	85,4579 (72,0577)
A 588 galvanizado	1,0285	4,6450
A 572 galvanizado	13,4041	2,7097

De acuerdo con los valores mostrados en la tabla 2, se observa baja velocidad de corrosión de los materiales. Como es de esperarse, las mayores velocidades de corrosión se presentan en el ambiente industrial, pues este ambiente tiene mayor concentración de sulfato. Por otro lado, no se observa ninguna diferencia importante entre las velocidades de corrosión de los aceros

autoprotectores y el acero A-572. Es posible que ello se deba a que el tiempo de exposición aún es muy corto como para que se noten diferencias en la constitución de la herrumbre. Se conoce que para tiempos de exposición menor de 5 años los aceros autoprotectores tienden a corroerse con la misma velocidad de corrosión de un acero al carbono convencional [5]. En esta

investigación, 2 meses de exposición en cámara equivalen a casi 2 años de exposición en campo [10]. También se observa que el proceso de herrumbrado poco ayudó en la formación de una herrumbre protectora en al A-588, al tener este acero la mayor velocidad de corrosión en ambos ambientes. Los aceros galvanizados presentaron velocidades de corrosión muy bajas, indicando excelentes propiedades protectoras de la capa de cinc aplicada.

La evaluación del aspecto visual de las probetas de acuerdo con la norma ISO 8501-1 al cabo de 2 meses de exposición en cámara indicó un grado de herrumbrado C para todos los aceros desnudos y D para el precorroído en los dos ambientes evaluados. Lo cual concuerda con la evaluación gravimétrica.

Evolución del potencial de circuito abierto (PCA) en cámara

En las figuras 1 y 2 se presenta la evolución del potencial de circuito abierto (PCA) de las probetas medido durante del periodo de inmersión en la cámara Cebelcor. En las figuras se observa la evolución del PCA hacia valores más positivos en los diferentes materiales y ambientes evaluados. Esto indica la existencia del permanente control anódico del proceso de corrosión metálica debido a la formación de una capa resistiva de productos de corrosión sobre la superficie del metal. No obstante, se evidencia una influencia importante de la naturaleza de la superficie y del tipo de ambiente sobre la evolución del PCA.

Para todos los metales evaluados, el PCA en la solución que simula atmósfera industrial está por debajo del de las probetas expuestas en la solución que simula atmósfera urbana. Esta situación indica posible despolarización anódica debido a la mayor conductividad de la capa de productos de corrosión, por la incorporación de mayor cantidad de iones de sulfato.

Se observa que la evolución del PCA hacia valores positivos es mucho mayor en las probetas desnudas que en las probetas de acero A-588

precorroído y que en las probetas de aceros A-588 y A-572 galvanizados. En las probetas desnudas la diferencia entre el potencial inicial a cero días de exposición y el PCA al finalizar a 60 días de exposición es de aproximadamente 300 mV, mientras que en las probetas precorroídas esta diferencia es de 200 mV y en las galvanizadas es de 100 mV, aproximadamente. Ello se debe probablemente a que las películas de productos de corrosión en las probetas precorroídas y galvanizadas son mucho más compactas y homogéneas dificultando la entrada de especies electroactivas como el ión sulfato y el oxígeno, ocasionando aumento en la polarización catódica del metal y por tanto valores más negativos de PCA.

En los diferentes tipos de acero evaluados se observa que el PCA en el ambiente urbano es más positivo que en el ambiente industrial. Este comportamiento puede deberse a una menor polarización anódica de los materiales expuestos en el ambiente industrial, ocasionada por la mayor concentración de sulfatos [SO_4^{2-}] en el electrolito y posiblemente en la herrumbre formada. La incorporación de especies conductoras, como el SO_4^{2-} , en la herrumbre traería como consecuencia menor resistividad de la herrumbre y posiblemente menores propiedades protectoras.

Al cabo de 60 días de exposición en los dos ambientes evaluados los aceros desnudos y el precorroído presentan PCA muy próximos, indicando poca diferencia en su comportamiento frente a la corrosión atmosférica. Lo mismo puede decirse para los aceros galvanizados.

Impedancia de probetas desnudas y precorroídas

En los diagramas de impedancia de las probetas desnudas se observan desde el inicio de la exposición tres arcos capacitivos característicos de las constantes de tiempo de tres procesos electródicos diferentes, (figura 3). Antes de iniciar la exposición (0 días), la primera constante de tiempo está constituida por un pequeño arco capacitivo abierto a altas frecuencias, debido posiblemente a la alta resistividad del electrolito y a la gran área de las

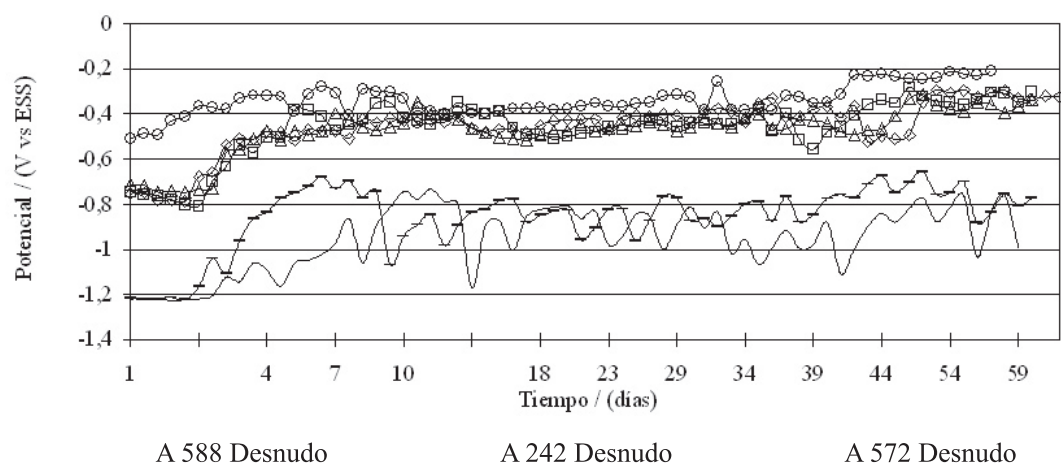


Figura 1 Evolución del PCA en el tiempo de los materiales evaluados en cámara cebelcor en ambiente que simula atmósfera urbana: (-□-) A-588 desnudo, (-Δ-) A-242 desnudo, (-◇-) A-572 desnudo, (-○-) A-588 precorroído, (—) A-588 galvanizado, (-) A-572 galvanizado

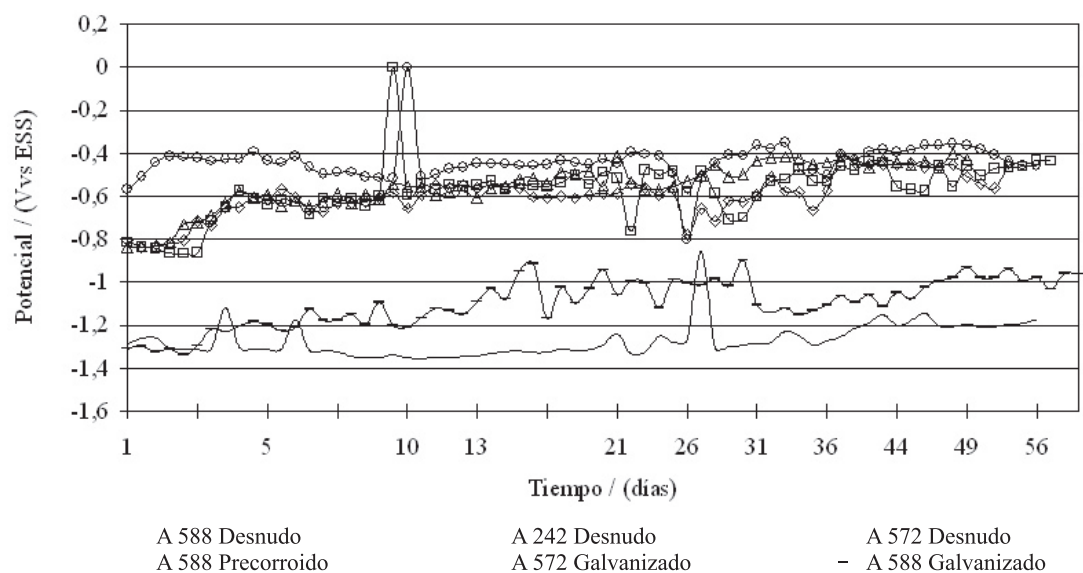


Figura 2 Evolución del PCA en el tiempo de los materiales evaluados en cámara cebelcor en ambiente que simula atmósfera industrial: (-□-) A-588 desnudo, (-Δ-) A-242 desnudo, (-◇-) A-572 desnudo, (-○-) A-588 precorroído, (—) A-588 galvanizado, (-) A-572 galvanizado

probetas. La segunda constante de tiempo se forma a frecuencias intermedias y con una resistencia asociada de aproximadamente 200 ohm. La tercera constante de tiempo se muestra a bajas frecuencias como un gran arco tendiendo a cerrar en el límite de frecuencia cero, con una resistencia asociada cercana a los 3.000 ohm. Los tres arcos descritos cambian a

medida que aumenta el tiempo de exposición. Es así como a 60 días los dos primeros arcos disminuyen de tamaño y el tercer arco aparece completamente abierto. De acuerdo con las características descritas de los diagramas de impedancia y su evolución durante el tiempo de exposición, puede decirse que el primer arco es característico del proceso de trans-

ferencia de carga en el metal en paralelo con la carga de la doble capa eléctrica. El segundo arco capacitivo estaría asociado a la herrumbre en proceso de forma-

ción, la cual se consolida con el aumento del tiempo de exposición y el tercer arco se asocia al proceso de difusión de especies a través de la herrumbre.

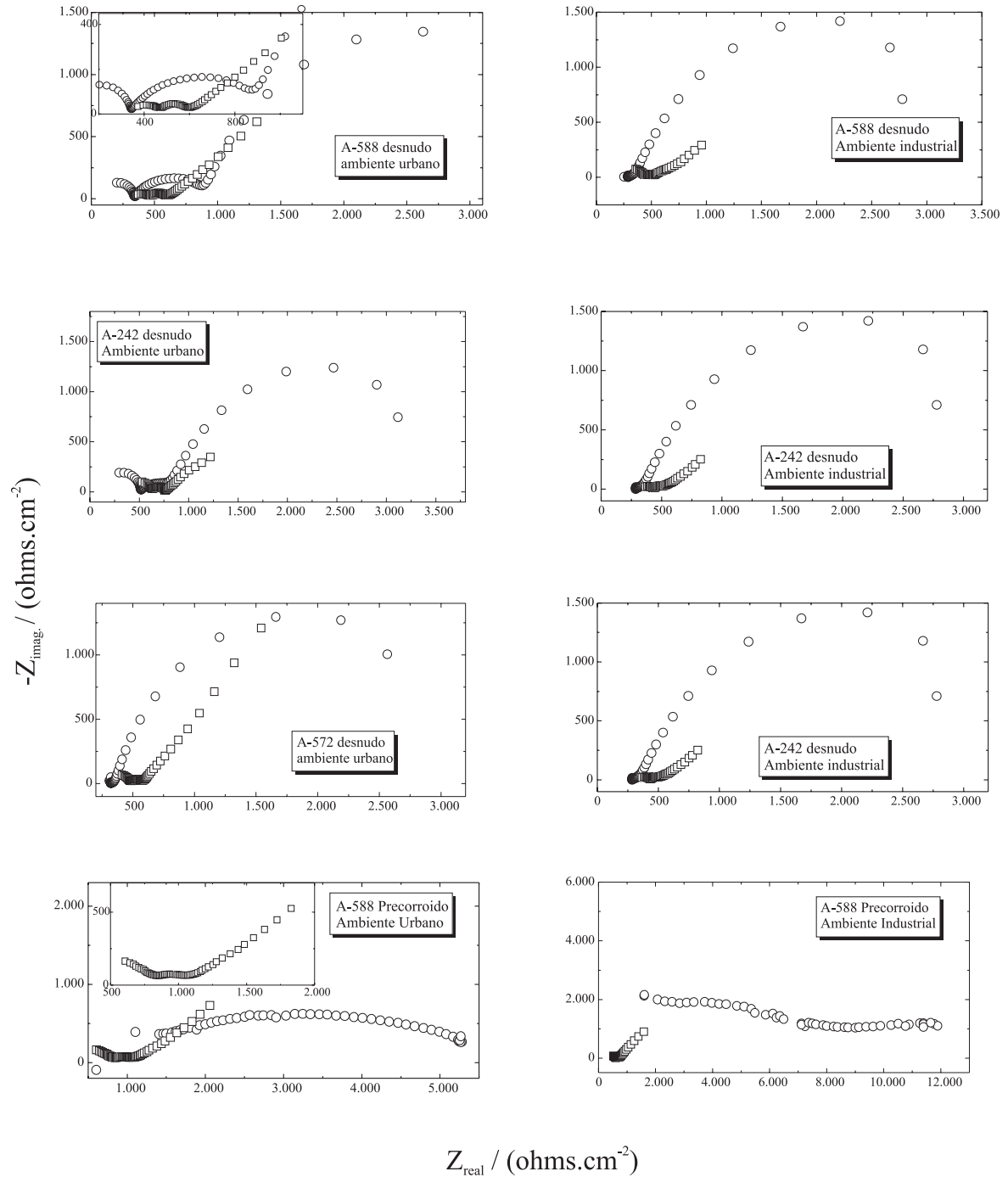


Figura 3 Impedancia electroquímica de probetas desnudas y precorrida: (o) 0 días y (□) 60 días de exposición en los diferentes ambientes evaluados

Es de destacar que en momento iniciar la exposición todos los procesos que suceden durante la corrosión de los aceros son mostrados por la impedancia electroquímica. A cero días, el tercer arco en todos los diagramas tiende a cerrarse en el límite de frecuencia cero indicando la resistencia a la polarización del metal y una incipiente formación de herrumbre sobre el metal. Con el aumento de tiempo de exposición la herrumbre se estabiliza y se constituye en una barrera al paso de especies hacia la intercara metálica. Por ello a 60 días de exposición el tercer arco aparece completamente abierto, indicativo de procesos de difusión de especies.

De acuerdo con los resultados de la impedancia a cero y 60 días de exposición no se observa ninguna diferencia significativa en el comportamiento de los aceros A-588, A-572 y A-242 desnudos. Los valores de resistencia de transferencia de carga y de resistencia a la polarización de los diferentes materiales son muy similares. Esto quiere decir que durante los primeros días de exposición los aceros tienden a corroerse de la misma manera sin importar su naturaleza.

El análisis de los diagramas de impedancia de las probetas precorroídas se dificulta grandemente debido a la dispersión de los datos y a que los respectivos diagramas, a cero días de exposición, se encuentran distorsionados observándose muy achatados (figura 3). La distorsión de dichos arcos puede deberse a la alta heterogeneidad de la herrumbre formada. En tales condiciones pueden presentarse múltiples procesos de transferencia de carga y diferentes superficies para la doble capa eléctrica, que dificultan grandemente las medidas. Para 60 días de exposición, los diagramas de impedancia son más coherentes, indicando mayor uniformidad de la herrumbre. A 60 días de exposición los diagramas están constituidos por dos arcos capacitivos a altas y medias frecuencias y una línea recta a bajas frecuencias, de forma similar a las probetas desnudas con el mismo tiempo de exposición. El análisis realizado para las probetas desnudas es igualmente válido para las probetas precorroídas. A 60 días

de exposición no se nota ninguna diferencia significativa entre el acero A-588 desnudo y en estado precorroído.

Impedancia probetas galvanizadas

En la figura 4 se presentan los diagramas de impedancia de las probetas galvanizadas en los ambientes simulados. Al inicio de la exposición los diagramas de impedancia están constituidos por un único arco capacitivo bastante achatado a altas y medias frecuencias. Dicho arco puede relacionarse con los procesos de cargamento de la doble capa, resistencia de transferencia de carga y formación de productos de corrosión del cinc acoplados. A bajas frecuencias, se presenta un arco inductivo que puede relacionarse con procesos de disolución del cinc.

Con el aumento del tiempo de exposición los diagramas de impedancia de los dos materiales cambian drásticamente, presentándose dos arcos capacitivos bien diferenciados indicando un desacople de los procesos fisicoquímicos involucrados. El primer arco a altas frecuencias, de menor tamaño, está relacionado con los procesos de carga de la doble capa eléctrica y resistencia de transferencia de carga desacoplados al proceso de formación de la capa de productos de corrosión del cinc. El proceso de formación de dicha capa está caracterizado por el segundo arco capacitivo. Con el aumento del tiempo de exposición se observa incremento significativo en el tamaño del segundo arco, indicando aumento del carácter protector de los productos de corrosión del cinc.

De acuerdo con el análisis de impedancia, el comportamiento de los aceros A-588 y A-572 galvanizados es idéntico. Esto era de esperarse, pues las características del recubrimiento del cinc son similares en ambos aceros. En ninguno de los aceros se evidencia la existencia de procesos de corrosión del sustrato de acero a 60 días de exposición, solo se evidencia la corrosión y transformación de la capa de cinc.

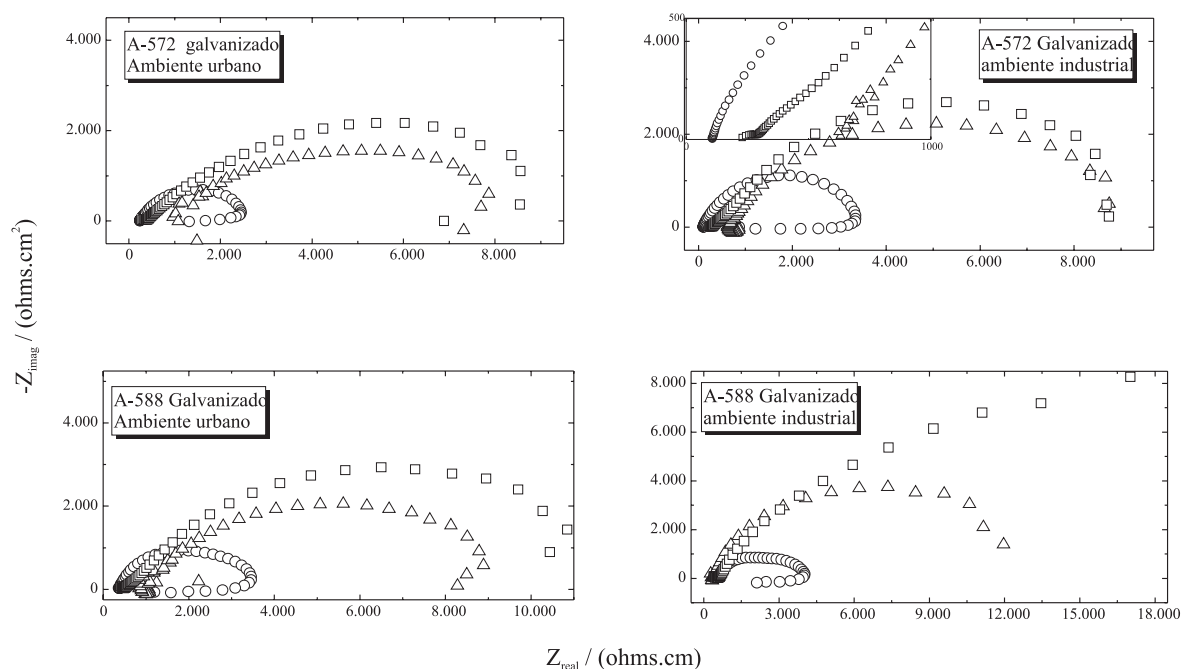


Figura 4 Impedancia electroquímica de probetas galvanizadas: (o) 0 días, (Δ) 30 días y ($\square$) 60 días de exposición en los diferentes ambientes evaluados

Conclusiones

Todas las técnicas de evaluación aquí presentadas indican que no se observan diferencias importantes en el comportamiento frente a la corrosión atmosférica de los aceros autoprotectores y el acero al carbono. Ello puede obedecer al poco tiempo de exposición de los materiales hasta ahora alcanzado. Es necesario un tiempo mínimo de exposición para que se desarrolle y consolide herrumbre con buenas propiedades protectoras en los aceros autoprotectores, de modo que puedan apreciarse diferencias en su comportamiento, mediante las técnicas de evaluación, en relación con el acero al carbono.

De acuerdo con la evolución del PCA durante el periodo inicial de corrosión se observa un predominante control anódico en los aceros desnudos. Sin embargo, pasados los primeros 15 días de exposición se vislumbra un control catódico en los procesos de corrosión, principalmente en el acero precorroído.

La impedancia electroquímica se presenta como una técnica valiosa con la cual puede monitorearse la formación y el crecimiento de la herrumbre de los aceros autoprotectores.

A 60 días de exposición en la cámara cebelcor las probetas galvanizadas presentan excelente desempeño frente a la corrosión. Las técnicas electroquímicas aquí utilizadas revelan únicamente la actividad del cinc del recubrimiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Acerías de Caldas S. A. (ACASA) y a la Universidad de Antioquia por el apoyo brindado en la realización de este proyecto.

Referencias

1. S. Feliu, M. Morcillo. *Corrosión Atmosférica de Metales*. Mapas de España de Corrosividad Atmosférica. Ed. Manuel Morcillo y Sebastián Feliu. CYTED Madrid España, 1982. pp. 1-9.

2. R. Oliveira. Características e aplicações dos aços patináveis”. B. téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro. Vol. 24. 4. 1981. pp. 261-268.
3. C. P. Larrabee , S. K. Coburn. “The atmospheric corrosion of steel as influenced by changes in chemical composition“. 1.º. ICMC. London. 1961. pp. 276-288.
4. J. B. Horton. “The rusting of low alloy steel in the atmosphere”. Pittsburgh regional technical meeting of the American Iron and Steel Institute. 1965. pp. 1-24.
5. M. Pourbaix. “Journée d’étude de la CEFA, Corrosion atmosphérique des aciers patinables”. Rapport Technique 217, Ed. CEBELCOR, Bruxelles. 1973. pp. 18-32.
6. V. Popova. “Corrosion resistance of low-alloy steels in the atmosphere”. *Zachita metallov*. Vol. 18. 1983. pp. 174-180.
7. A. Raman, S. Nasrazadani and L. Sharma. “Morphology of rust phases formed on weathering steels in various laboratory corrosion test”. *Metallography*. Vol. 22. 1989. pp. 79-96.
8. J. A. Calderón. *Evaluación de la técnica de alambre sobre tornillo para estudios de corrosión atmosférica*. Trabajo de investigación en Maestría en Ciencias Químicas. Universidad de Antioquia, Medellín. 1999.
9. ASTM A-242 “Specifications for High-Strength Low-Alloy Structural Steel”. American Society for testing and Materials.
10. J. L. Rendón. *Acción conjunta de los cloruros y los sulfatos en la corrosión del acero al carbono*. Trabajo de investigación en Maestría en Ciencias Químicas, Universidad de Antioquia, Medellín. 1997.