

Corrosion Rate Evaluation of the Copper Cable Used in Grounding Systems at the ICE – Costa Rica

G. Tres,* E. Saborio

*Centro de Investigación en Corrosión, CICorr-ICE, Plantel de Colima, Tibás
San José, Costa Rica*

Received 13 February 2004; accepted in revised form 12 July 2004

Abstract

This research was made to determine the corrosion rate of the copper cable used in grounding and lightning systems, at the electrical generation plants from the Costarrican Electrical Institute. The methods used were linear polarization resistance (LPR), and the weight loss one. This report includes both, laboratory and field tests of corrosion rates, using as electrolytes two products commercially available. Moreover, some electrochemical experiments were developed at the laboratory, in order to know the reaction mechanisms.

The goal of this study was to generate criteria for the maintenance and/or the substitution of copper cables according to their deterioration. The results showed that the corrosion rate in "A" is at least ten times higher than in "B". In addition, several samples in the "A" electrolyte had pitting corrosion.

The study indicates that from the point of view of the corrosion it is preferable to use product "B" like filling, since the generalized corrosion of copper is lower and in addition localized damage does not appear.

Keywords: linear polarization resistance, generalized corrosion, pitting corrosion, polarization curves, cyclic voltammetric curves, grounding and lightning systems.

Introducción

En años recientes el ICE ha realizado el diseño, implantación y mantenimiento de sistemas contra descargas atmosféricas; así como las correcciones o readecuaciones de las protecciones existentes de puesta a tierra en algunas plantas de generación eléctrica [1].

* Corresponding author. E-mail address: Gtres @ice.go.cr

Las puestas a tierra están conformadas por geometrías de cables y electrodos, generalmente de cobre, enterrados en contacto directo con el suelo y más comúnmente en un relleno de baja resistividad eléctrica; esto con el fin de dispersar corrientes menores de carga estática, fuga, desbalance, erráticas y ocasionalmente las de mayor magnitud como corrientes inducidas, de corto circuito o de rayo. Estos sistemas aseguran la protección de personas contra descargas eléctricas y permiten el correcto funcionamiento de aparatos eléctricos y electrónicos [2].

Tanto en las mallas de aterrizado como en los sistemas de pararrayos se emplean lodos altamente conductivos como las bentonitas, que son arcillas que por sus propiedades favorecen el drenaje de corriente. El empleo de bentonita, agua y sal (NaCl) para el relleno de huecos y zanjas de la puesta a tierra, permite obtener la humedad casi constante a nivel molecular en el terreno aumentando la conductividad [3].

Específicamente en la Planta de Generación de Miravalles (PGM) del ICE, se utilizaron arcillas en los primeros tres metros del subsuelo de las puestas de tierra, para lograr una resistencia cercana a un ohmio [1]. El efecto de estas sustancias en el deterioro del cable de cobre (4/0 AWG = 15.9 mm diámetro exterior) es el objeto de interés de esta investigación.

La cinética de la corrosión se evaluó por la técnica electroquímica de Resistencia de Polarización Lineal (RPL), así como por gravimetría, con el fin de complementar las ventajas de ambos métodos. Por un lado, el método gravimétrico es más exacto que los electroquímicos, sin embargo con los últimos es posible hacer mediciones instantáneas [4].

Parte experimental

Se realizaron ensayos electroquímicos de laboratorio y de campo con los potencio-galvanostato marca ACM Instruments, modelos Gill 8 AC y Field Machine V2, respectivamente. Se utilizaron dos tipos de muestras: "A", un producto a base de carbono, cementos hidráulicos y silicatos de aluminio hidratados, y "B", un tipo de bentonita, mezclado con cloruro de sodio al 5%

m/m. Ambos materiales se emplearon para los ensayos de campo y laboratorio y se les agregó agua para formar un lodo.

La velocidad de la corrosión se determinó con la técnica de LPR; con un barrido potenciodinámico y en el intervalo de ± 10 mV alrededor del potencial de circuito abierto, a una velocidad de 100 mV/min y realizando 20 lecturas por barrido, con pausa de 30 s entre cada una. Se usó un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl sat.) para los ensayos de laboratorio; y un electrodo de acero al carbono, de 350 cm², para los ensayos de campo. Se empleó un valor intermedio de la constante B de la ecuación de Stern and Geary de 0.026 V [5].

Ensayos de laboratorio

Las mediciones con la técnica de RPL se realizaron inicialmente cada semana y luego cada dos semanas cubriendo un período total de ocho meses. Se realizaron curvas de polarización y voltamétricas anódicas cíclicas. Cada vez que se hicieron barridos por RPL, se midió la conductividad eléctrica, el potencial de corrosión (E_{corr}) y el pH.

Aparte de los ensayos en las muestras “A” y “B”, también se corrieron curvas de RPL en muestras de electrolitos de bentonita sin cloruro de sodio y de suelo extraído del sitio de la malla del campo.

Por último, se tomaron fotografías de los alambres al final del período de exposición en los medios, con un estereomicroscopio marca Olympus, modelo sz 1145. En la Fig. 1a se muestra un esquema de la celda empleada.

Ensayos de campo

Las mediciones se realizaron aproximadamente cada dos meses, a lo largo de un año en la Planta Geotérmica Miravalles, específicamente en las arquetas P-A pozo, con medio “A” y P-B pozo con medio “B”. En la Fig. 1b aparece el diagrama de una arqueta.

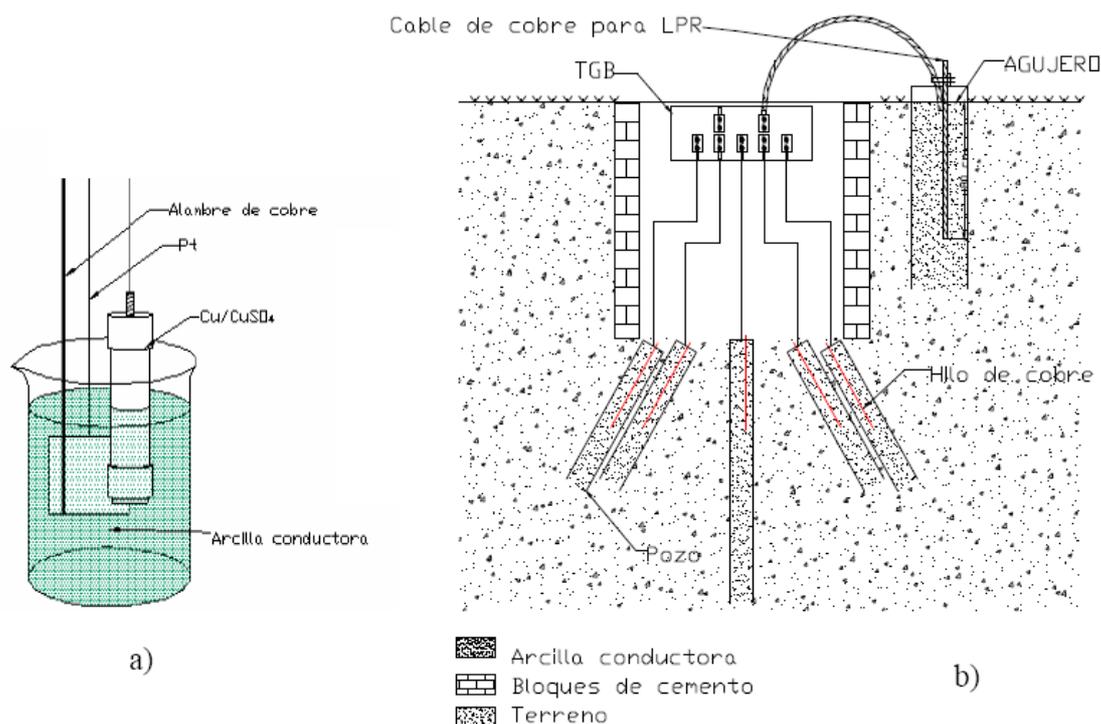


Figura 1. a) Diagrama de la celda empleada en los experimentos de laboratorio. b) Representación de una arqueta, se aprecia el hueco donde se introdujo un trozo de cable de cobre para mediciones de LPR.

Para las mediciones de LPR se hizo una excavación fuera de la arqueta, de aproximadamente 15 cm de diámetro y un metro de profundidad; luego se agregó el electrolito correspondiente; y por último, se enterró 80 cm de cable de cobre igual al empleado para la malla. Esta muestra de cable tenía un área de 385 cm², la cual permaneció conectada al BTA (barra terminal a tierra), excepto cuando se hicieron mediciones. Ver detalle en la Fig. 1b. Se determinó el efecto de la caída IR empleando el método de interrupción de corriente, usando el equipo interruptor de corriente temporizado, marca Wellekes Elektronik.

Para los ensayos de pérdida de masa se colocaron segmentos de alambre del cable, de área y masa conocida, dentro de la arqueta, como se muestra en la Fig. 1b. La limpieza química de los productos de corrosión se realizó de acuerdo con la especificación c.2.1 de la norma ASTM G1 [6]. Para la medición de la masa se empleó una balanza analítica, marca Sartorius, modelo BP210 S con una precisión de 0.1 mg. Las dimensiones de los cables se midieron con un pie de rey manual, marca STM, con una precisión de 0.01 mm. Se realizó análisis

químico a muestras superficiales de suelo, extraídas de las arquetas, al igual que la inspección visual del cable y los hilos al final de la prueba.

Resultados y discusión

Ensayos de laboratorio

En la Tabla 1 se muestran los resultados de velocidad de corrosión por RPL. En promedio, la velocidad del cobre en el medio “A” es un orden de magnitud mayor que en “B”. Estos datos muestran un comportamiento sin una tendencia definida que puede obedecer a la formación de productos poco protectores; lo cual es sugerido por el comportamiento tafeliano de la curva de polarización en el caso de “A”, ver Fig. 2; o a que el tiempo de exposición fuera insuficiente para permitir la pasivación del cobre.

Tabla 1. Resultados de laboratorio de velocidad de corrosión por LPR .

Tiempo (días)	“A” (mm/año)	“B” (mm/año)	“B” sin NaCl (mm/año)	suelo de PGM (mm/año)
1	0.84	0.11	0.012	No se midió
10	1.37	0.04	0.02	No se midió
39	0.80	0.03	0.027	No se midió
46	0.17	0.04	0.035	No se midió
52	0.72	0.04	0.022	No se midió
60	0.90	0.05	0.017	No se midió
66	1.01	0.06	0.014	0.007
84	0.90	0.05	0.014	0.007
99	0.11	0.06	0.036	0.02
119	0.58	0.07	0.08	0.02
134	0.55	0.08	0.086	0.02
151	0.34	0.04	0.087	0.03
190	0.23	0.11	0.108	0.02
239	0.08	0.08	0.057	0.01
Prom	0.6	0.06	0.04	0.017

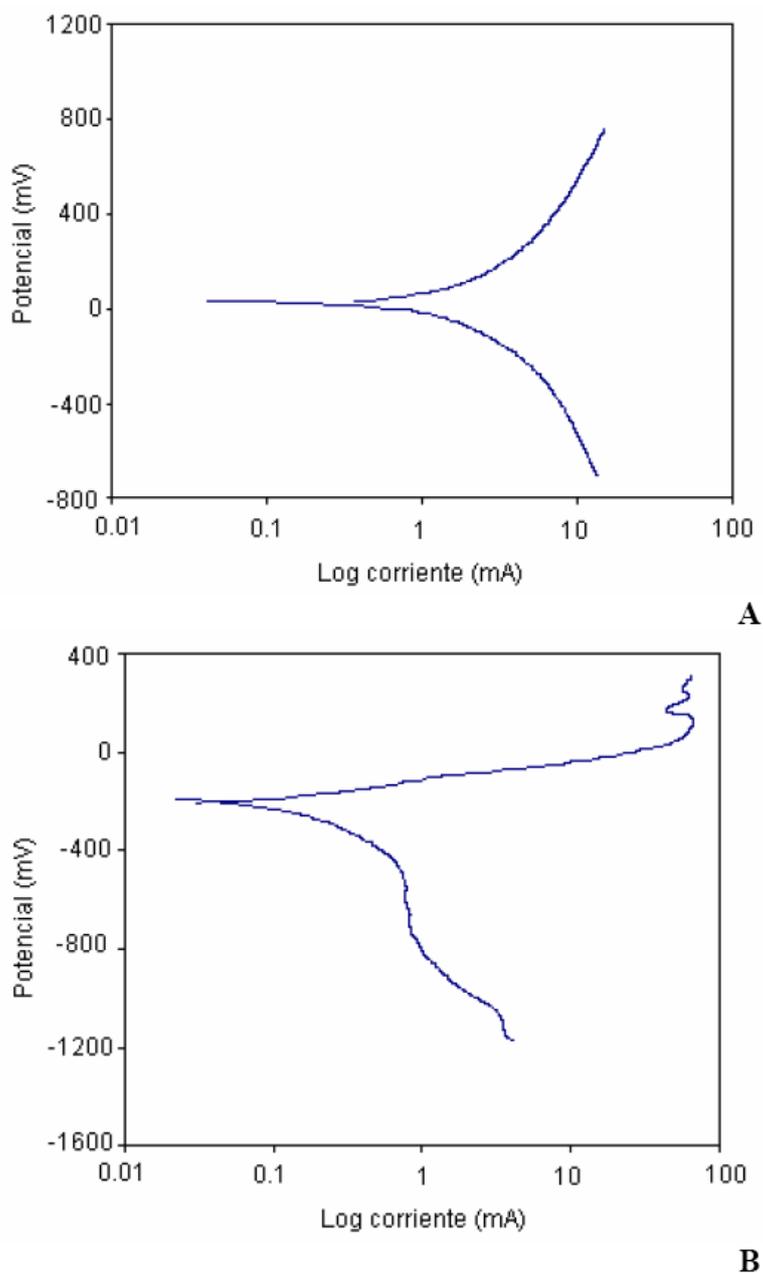


Figura 2. Curvas de polarización del cobre en los medios “A” y “B”.

Como se muestra en la Tabla 2, en los experimentos de campo tampoco se obtuvo una disminución de la velocidad en el tiempo o pasivación; sin embargo, el promedio es el mismo al obtenido en el laboratorio con la técnica electroquímica.

Tabla 2. Resultados de campo de velocidad de corrosión por gravimetría y por LPR del cobre.

Tiempo (meses)	Vel-grav "A" (mm/año)	Vel-grav "B" (mm/año)	Vel-LPR "A" (mm/año)	Vel-LPR "B" (mm/año)
2	0.08	0.01	no se midió	no se midió
4	0.05	0.007	0.05	0.028
6	0.20 ^a	0.004	0.17	0.062
8	0.01	0.003	2.73	0.05
10	0.01	0.008	0.08	0.107
12	0.01	0.004	0.06	0.04
Prom	0.06	0.006	0.6	0.06

a: La mayor pérdida de masa de esta muestra coincide con el ataque localizado más severo mostrado en la Fig. 5a.

En la curva de polarización de "A" mostrada en la Fig. 2, se aprecia que los valores de la rama anódica y catódica son muy similares en el eje de las abscisas, lo que significa que ambas hemireacciones contribuyen significativamente a la cinética de la corrosión. La forma de las curvas también indica un control mixto, ya que al inicio se da polarización por transferencia de carga y luego por concentración. El pH promedio fue de 11.8 ± 0.7 y aunque en general se reporta un buen comportamiento del cobre en medios neutros y alcalinos [7, 8], a pH tan altos puede darse un incremento en la corrosión, por la formación de CuO_2^{2-} a altas concentraciones de OH^- [9,10].

En el caso de "B" se da una disolución anódica, no tafeliana, controlada por difusión y que presenta una corriente límite en la rama catódica [4]. Debido al pH alcalino del lodo (8.0 ± 0.5) y a que los componentes principales del mismo son dióxido de silicio y óxido de aluminio, probablemente la transferencia de masa se debe a la reducción del O_2 . También otros experimentos en presencia de sales con Cl^- han demostrado control de masa por CuCl_2^- desde la interfase a la disolución o por cloruros en la dirección opuesta [11].

Como la etapa controlante tiene lugar en el electrolito las impurezas y microestructura del metal no tienen influencia directa en la velocidad de corrosión; es por esto que el cobre y sus aleaciones pueden utilizarse en la mayoría de disoluciones neutras y alcalinas, siempre y cuando la aireación y turbulencia no sean excesivas [12].

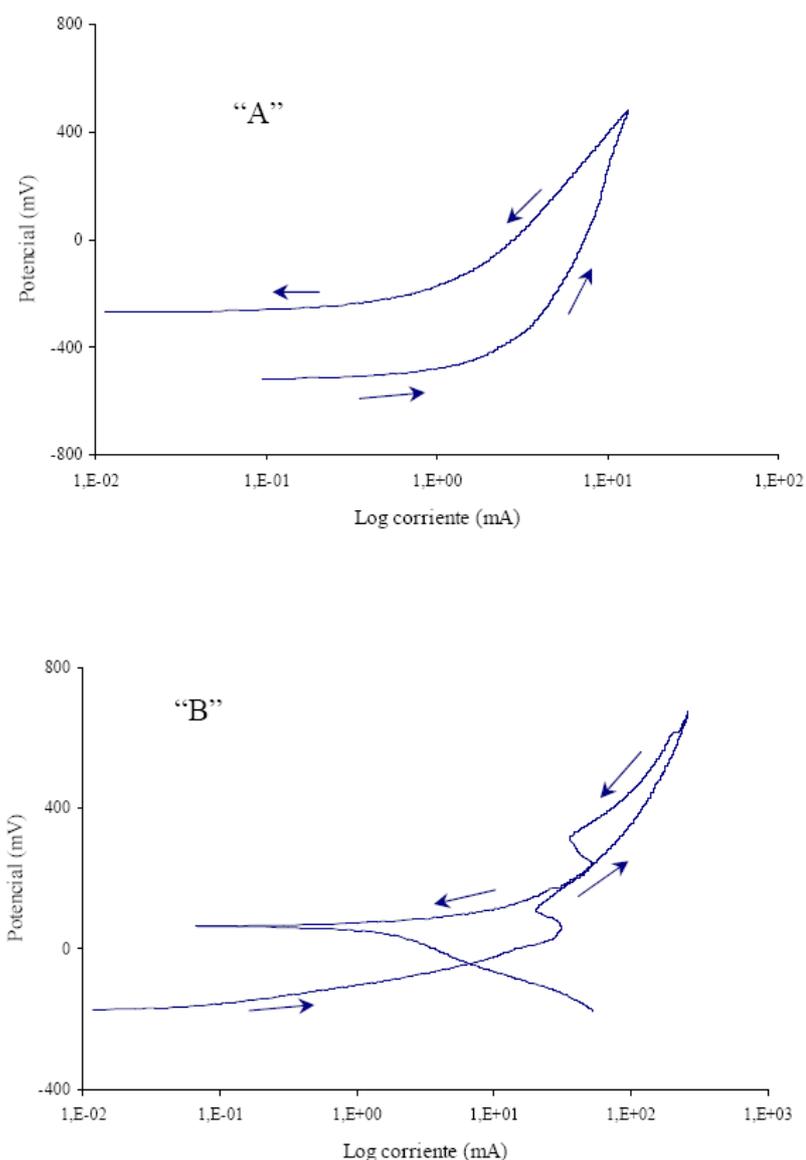


Figura 3. Curvas voltamétricas cíclicas del hilo de cobre en los electrolitos “A” y “B” al inicio de los experimentos. Velocidad de barrido 10 mV/min.

Para determinar si la adición de NaCl incrementa la velocidad de corrosión se hicieron experimentos con bentonita sin sal; sin embargo, los resultados fueron similares, ver Tabla 1; incluso, los productos de corrosión tenían forma como de hojuelas poco adherentes en este último caso. Otro aspecto interesante de destacar de las curvas de polarización es que la densidad de corriente de corrosión en “A” es mayor (1 mA/cm^2) que en “B” (0.1 mA/cm^2), lo cual es consistente con los resultados obtenidos por RPL.

Las curvas voltamétricas cíclicas anódicas en los dos electrolitos, indican que no se da corrosión por picadura, pues las curvas no presentan histéresis, es decir en su regreso no se incrementan sustancialmente los valores de densidad de corriente; ver Fig. 3.

Aunque estudios han reportado al Cl^- como un agente de propagación de picaduras en cobre [13], otros han demostrado que en la práctica reduce la severidad del picado [14]. Por ejemplo, Eduard et al. [15], demostraron en ensayos potenciostáticos de varias horas, que sistemas conteniendo Cl^- , tuvieron una aparente tendencia a causar picadura al inicio pero que resultaron ser los más pasivantes al final de los experimentos con varios iones.

La inspección visual permitió verificar la ausencia de ataques localizados, ver Fig. 4. Este resultado no implica que no se puedan presentar otros fenómenos localizados, por ejemplo sí la capa que se forma se destruye mecánicamente, o por variantes en el medio real, como la acción de bacterias [16] o por efecto de corrientes vagabundas e inducidas [17].

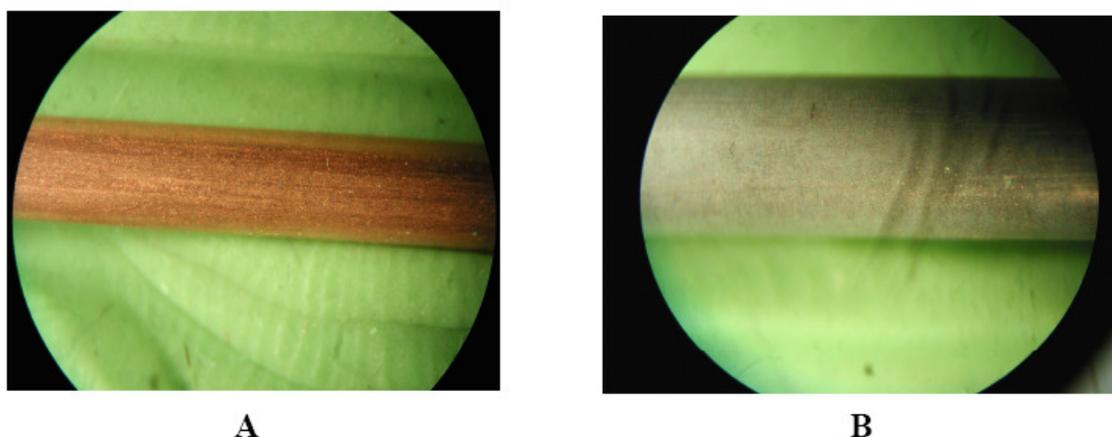


Figura 4. Fotografías de los hilos de cobre luego de expuestos ocho meses en el medio “A” y “B” durante los ensayos de laboratorio. Aumento: en “A” 15x, en “B” 10x.

Los resultados indican que la resistividad no es un factor determinante en la cinética de corrosión del cobre en los medios evaluados. Por ejemplo, las resistividades en “A” y en “B” fueron bajas, ($163 \Omega\cdot\text{cm}$ y $66 \Omega\cdot\text{cm}$, respectivamente), sin embargo las velocidades de corrosión (ver tabla 1) no

variaron significativamente con respecto a la de la muestra de suelo, cuya conductividad fue de 2132 $\Omega\cdot\text{cm}$.

Ensayos de campo

A partir de los datos de gravimetría y la Ley de Faraday se estimó la constante B de la ecuación de Stern y Geary [18], y se obtuvo un valor promedio de 0.025 V \pm 0.004, con lo cual se corroboró que el valor empleado (B = 0.026 V) no altera los resultados.

Como se muestra en la Tabla 2, aunque los resultados por gravimetría y LPR no corresponden, sí se obtuvo la misma diferencia de un orden de magnitud entre “A” y “B”. Esta diferencia puede deberse a varias limitaciones intrínsecas de la técnica de resistencia de polarización, tales como: la inexactitud del método por estar basado en una aproximación matemática [18], que las funciones de la corriente anódica y catódica son lineales alrededor del E_{corr} , la incertidumbre por el desconocimiento de las pendientes de Tafel, las variaciones del potencial de corrosión en el tiempo [4].

Se evaluó la caída IR en los dos medios y se determinó que no afecta significativamente los resultados. La caída óhmica máxima en el medio “A” fue de 0.3 Ω y en “B” de 0.2 Ω para valores promedio de R_p de 9 Ω y 7 Ω , respectivamente; por lo que el error, IR/ R_p , es muy bajo. En todo caso, esto explicaría resultados por defecto de la velocidad de corrosión.

La corrosión, por pérdida de masa, varió entre 3 y 10 $\mu\text{m/año}$ en el medio “B” y entre 10 y 200 $\mu\text{m/año}$ en el medio “A”. Este último valor coincide con la muestra que sufrió mayor ataque localizado, ver la Fig. 5. En “B” no se presentó ataque localizado (Fig. 5b).

Por otro lado, las inspecciones visuales que se realizaron a lo largo del cable de la malla muestran un desgaste generalizado y leve. Esto indica que las acciones deben enfocarse en el abastecimiento de las bentonitas o sales que mejoran la conductividad del terreno y que se diluyen con las lluvias, más que en el daño por corrosión.

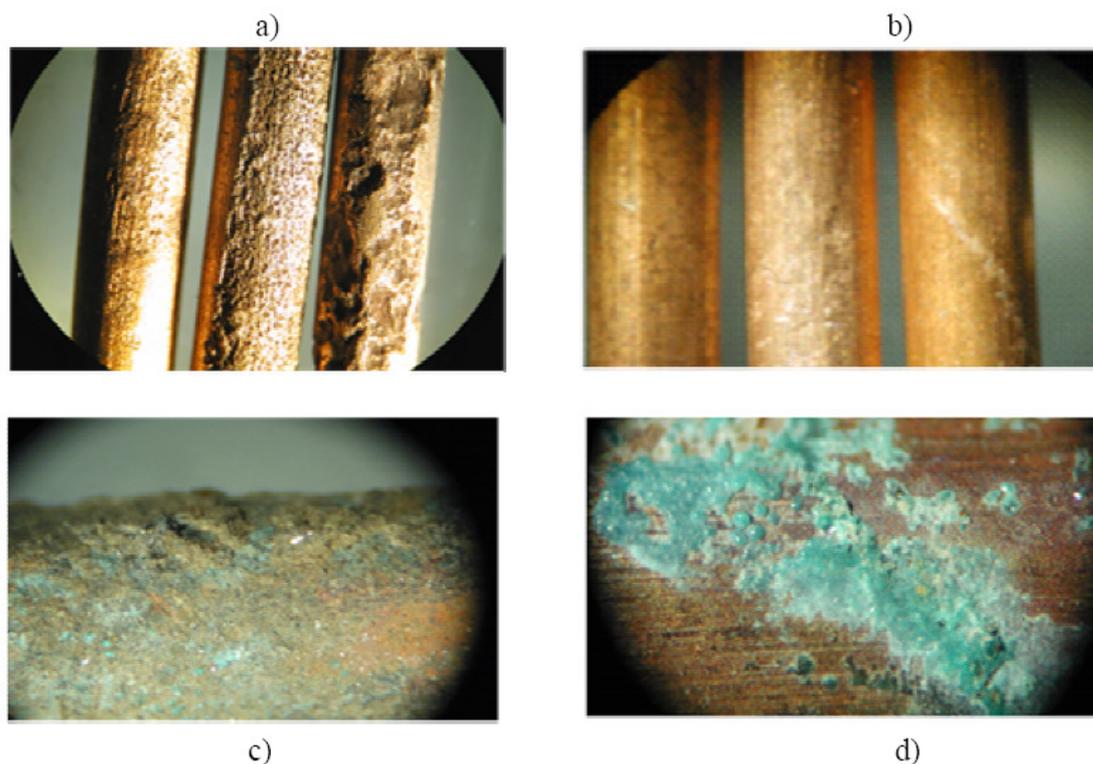


Figura 5. a) Degradación paulatina de hilos de cobre expuestos al medio “A” en el campo, aumento: 10x; b) Degradación paulatina de hilos de cobre expuestos al medio “B” en el campo, aumento: 15x; c) Productos de corrosión de una muestra de hilo de cobre expuesta al medio “A” en el campo, aumento: 25x; d) Productos de corrosión de una muestra de hilo de cobre expuesta al medio “B” en el campo, aumento: 35x.

Los hilos de cobre de los experimentos por pérdida de masa presentaron productos de corrosión coloreados, porosos y poco adherentes. En las Fig. 5c y 5d, aparecen las fotografías que muestran el efecto mencionado. Esto pudo deberse a las condiciones de heterogeneidad del medio, ya que los pozos están rellenos con “A” o “B” pero mezclados con el suelo y arcillas naturales del terreno; y también a las diferencias de humedad y de oxígeno, que dependen del clima y profundidad en el pozo.

Estos hilos estuvieron enterrados entre 15 y 20 cm de la superficie, por lo que la aireación fue mayor que en las condiciones reales del cable de la malla, que estuvo aproximadamente a 1 m, lo que explica su buen estado.

La razón por la cual se conectaron los tramos de cable a la TGB de las arquetas fue para determinar el posible efecto de descargas atmosféricas, sin embargo el registrador de los pararrayos no registró eventos. Tampoco se detectaron daños por el enrollado de los hilos en el cable.

En este punto, se puede mencionar que el electrolito “A” se endurece grandemente y la extracción de la muestra de cable sólo fue posible excavando hasta el fondo, lo que hace el trabajo para sustitución de este material o del cable muy laborioso en el campo; especialmente porque los pozos tienen profundidades entre 3 y 6 metros.

Se realizó análisis químico a muestras de suelo tomadas de las arquetas, ver Tabla 3. Como se aprecia la concentración de contaminantes como sulfuro y sulfatos no es despreciable, lo cual se debe a las grandes cantidades de H₂S expelidas a la atmósfera, como subproducto del ciclo geotérmico para la obtención de energía eléctrica [19]. Es importante destacar que las resistividades y los pHs difieren de los obtenidos en el laboratorio debido a la naturaleza de las muestras. Como se observa en la Tabla 3, los suelos mezclados con “A”, que presentaron menor resistividad y concentración de contaminantes coinciden con los hilos de cobre que tenían corrosión localizada; sin embargo en el caso de la bentonita, las condiciones son más severas y no se presentó picadura. En estudios similares no se ha encontrado una relación directa entre la velocidad de corrosión y algún componente químico en el suelo [20], así mismo Ekbohm [21] no encontró una relación estadística al respecto. Asimismo, un estudio de siete años realizado por el Instituto de Corrosión de Suecia [22], en el que se evaluó el comportamiento de varios metales enterrados en suelos demostró que valores bajos de pH o altos contenidos de sulfuros, sulfatos o cloruros no necesariamente resultan en un incremento de la corrosión.

Aunque en este estudio no se analizó el contenido orgánico de los suelos, es poco probable que se dé algún mecanismo de corrosión microbiológica, no sólo porque la actividad de bacterias es mucho más limitada en el cobre que por ejemplo en el hierro, sino porque éstas actúan en el ámbito de pH entre 4.5 y 6 y de potencial entre 0.3 V y 0.8 V [16], los cuales no corresponden a las condiciones obtenidas en el laboratorio ni en el campo.

Otro fenómeno que podría explicar la corrosión localizada son las corrientes parásitas e inducidas, ya que en este terreno hay tuberías metálicas, mallas de tierra de una torre de enfriamiento, así como la misma malla periférica.

Mediciones preliminares de campos eléctricos, comparando el voltaje entre dos electrodos permanentes portátiles de Cu/CuSO₄, reveló que los potenciales entre cable-tierra son al menos cuatro veces mayores que entre tierra-tierra; sin embargo, se requiere hacer ensayos normalizados para obtener resultados concluyentes al respecto.

Tabla 3. Caracterización de suelos superficiales donde se enterraron los hilos de cobre.

No.	medio	Cl ⁻ (mg/Kg suelo)	SO ₄ ⁼ (mg/Kg suelo)	S ⁼ (mg/Kg suelo)	pH	R (Ω m)	Pica- dura
1	A	20	50	40	8.56	200	NO
2	A	20	160	127	8.50	88	SI
3	B	340	270	117	8.20	18	NO
4	A	20	100	47	8.62	86	SI

También se realizó un mapeo de resistividad del terreno dentro de la arqueta P03, a 10 y 20 cm de profundidad, donde se colocaron los hilos de cobre. Los valores oscilaron entre 3000 y 7000 Ω·cm, considerados como muy poco agresivos desde el punto vista de la corrosión [23] y mucho menos conductivos que los electrolitos bajo estudio.

Finalmente y no menos importante son los costos de los materiales estudiados. El material “A” cuesta 0.83 \$U.S/lb, mientras que “B” 0.15 \$U.S/lb. El relleno de los 63 pozos con el material “A” requiere alrededor de \$U.S 6500 mientras que con B unos \$1200.

Conclusiones

1. Todos los ensayos, por pérdida de masa y RPL, indican que la velocidad de corrosión del cobre es mayor en el medio “A” que en el de “B”. Por otro lado, la bentonita (“B”) es mucho más barata y fácil de manipular para cualquier sustitución o labor de mantenimiento del cable de cobre.

Finalmente y ya que ambos productos permiten una excelente resistividad para el drenaje de las corrientes, se recomienda el empleo de la bentonita.

2. La velocidad de corrosión uniforme del cobre determinada por gravimetría es suficientemente baja en la bentonita, ya que aún después de 10 años el desgaste predicho es menor a 0.1 mm. El buen estado se confirmó en la inspección visual de las muestras de cable del experimento de LPR y en diferentes tramos donde se inspeccionó la malla.
3. No se confirmó la causa de la corrosión localizada observada en los hilos de cobre en la arqueta P03, medio "A" pero se recomienda un estudio que permita determinar si este efecto es o puede ser considerable para la definición más temprana de inspecciones de la malla.

Evaluación de la Corrosión del Cable de Cobre Utilizado en Sistemas de Aterrizamiento del ICE – Costa Rica

Resumen

En la presente investigación se evaluó principalmente la cinética de corrosión del cable de cobre empleado en las mallas de aterrizamiento de sistemas de pararrayos en plantas del Instituto Costarricense de Electricidad. Se aplicó tanto el método electroquímico de resistencia de polarización lineal (LPR; de sus siglas en inglés) como el gravimétrico. Se realizaron ensayos de laboratorio y de campo, empleando como electrolitos dos productos comercialmente disponibles para el aterrizamiento de mallas. También a nivel de laboratorio se desarrollaron experimentos electroquímicos para estudiar los mecanismos de reacción.

El objetivo fue generar criterios para el mantenimiento y o sustitución de los cables de cobre desde el punto de vista de su deterioro por el medio. Los resultados demostraron que la velocidad de corrosión en el electrolito "A" puede llegar a superar en más de un orden de magnitud a la de "B". Además, se presentó corrosión localizada en varias de las muestras de campo expuestas al medio "A". El estudio indica que desde el punto de vista de la corrosión es preferible utilizar el producto B como relleno, ya que la corrosión generalizada del cobre es menor y además no se presenta daño localizado.

Palabras clave: Resistencia de polarización lineal, corrosión generalizada, corrosión localizada, curvas de polarización, curvas voltamétricas anódicas cíclicas, mallas de aterrizamiento.

Referencias

1. G. Leandro, M. Monroe, "Implementación del Sistema de Puesta a Tierra y Pararrayos de Casa de Máquinas del Proyecto Geotérmico Miravalles", ICE, 2001.
2. J. Yanque, "Seguridad en el Diseño de Redes de Distribución Eléctrica", ElectroRedes, Lima, 1968.
3. P. Díaz, "Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra de Sistemas", McGraw Hill, México, 2000.
4. J.A. González, "Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas", GRAFIPREN, S.A., España, 1989.
5. M. Stern, E.D. Weisert, *Proc. Am. Soc. Test. Mat.* 59 (1959) 1280-1283.
6. ASTM G1, Vol 03.03, 1999.
7. ASM, Metals Handbook Desk Edition, ASM International, EEUU, 1998.
8. S. Feliu, "Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión", UIE de Corrosión y Protección del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, España, 1984.
9. ASM, Materials Selection and Design Handbook, Vol. 20, ASM International, EEUU, 1997.
10. A.J. Bard, "Encyclopedia of Electrochemistry of the Elements", Vol 2, Marcel Dekker, Inc., New York, 1974. p. 340.
11. J. Crousier, J.-P. Crousier, *Corrosion Sci.* 104 (1957) 56.
12. A. Butts, "Copper. The Science and Technology of the Metal, Its Alloys and Compounds", Hafner Publishing Company, New York, 1970.
13. E. García, J. Uruchurtu, J. Genesca, *British Corrosion J.* 36 (2001) 151.
14. A. Cohen, W.S. Lyman, "Service Experience with Copper Plumbing Tube", MP&P, EEUU, 1972.
15. M. Eduard, J. Rehring, T. Meyer, *Corrosion Sci.* 50 (1954) 366.
16. M.A. Guillén, *Corrosión y Protección* 9 (1978) 13.
17. M. de La Vega, "Ingeniería de Puesta a Tierra", LIMUSA, México, 1998.
18. M. Stern, A.L. Geary, *J. Electrochem. Soc.* 104 (1957) 56.
19. P. Moya, *Tecnología- ICE: Energía y Telecomunicaciones*, 11 (2001) 62.

20. P.T. Gilbert, *Corrosion* 1 (1947) 4:33-4:67.
21. L. Ekbom, *KBS Technical Report 90*, 1978, Nuclear Fuel Safety Project.
22. G. Camitz, T.G. Vinka, "Corrosion Resistance of Copper in Swedish Soils", Swedish Corrosion Institute, 2003.
23. S. Bradford, "Practical Handbook of Corrosion Control in Soils", CASTI Publishing Inc., Canada, 2003.