

LA AGRESIVIDAD DE LOS SUELOS DE MADRID Y VALENCIA Y EL EMPLEO DE LA PROTECCION CATODICA PARA EVITAR LA CORROSION DE LOS METALES ENTERRADOS.-II

Por MANUEL SERRA* y JUAN J. ROYUELA**

En la primera parte de este trabajo, publicado en nuestro número anterior, fueron expuestos los principios de los fenómenos corrosivos en los metales enterrados en suelos y se dió una visión de conjunto de los factores que los afectaban. En la segunda parte, inserta a continuación, tras dar los criterios de agresividad de los suelos, se discuten los diferentes métodos de protección hasta ahora empleados y se hace un estudio detallado del método conocido como Protección Catódica, en sus diversas variantes y aplicaciones, por ser éste el más eficaz de los empleados en la lucha contra la corrosión de estructuras metálicas enterradas.

(Continuación.)

Criterios de agresividad del suelo.

Dado el gran número de factores que se ha visto intervienen en la corrosión de estructuras metálicas enterradas en suelos, es natural que existan multitud de criterios para la caracterización de la agresividad de los mismos.

El análisis químico de los constituyentes de los suelos entraña, por una parte, una gran labor experimental, y, por otra, no aporta demasiada información sobre la agresividad. Esto no excluye que la mayoría de los autores crean necesario realizar el análisis químico de algunos de los iones más característicos, además de haber verificado otras medidas que ellos toman como criterios determinantes de la agresividad de los suelos.

Para Shepard [16], un suelo puede producir una corrosión importante si su resistencia es inferior a 500 $\Omega/cm.$, y que difícilmente se le podrá atribuir fuerza agresiva a un suelo si su resistencia es superior a 1 000 $\Omega/cm.$ Waters [17], en un estudio más detallado de la resistividad de los suelos, los clasifica de la siguiente manera:

- | | |
|--|---------------------------|
| a) Muy corrosivos, cuando la resistencia va de | 0- 900 $\Omega/cm.$ |
| b) Bastante corrosivos, cuando la resistencia va de | 900- 2 300 $\Omega/cm.$ |
| c) Moderadamente corrosivos, cuando la resistencia va de | 2 300- 5 000 $\Omega/cm.$ |
| d) Ligeramente corrosivos, cuando la resistencia va de | 5 000-10 000 $\Omega/cm.$ |
| e) Muy ligeramente corrosivos, por encima de | 10 000 $\Omega/cm.$ |

* Doctor en Ciencias Químicas, Investigador y Jefe de la Sección de Electroquímica y Corrosión del Departamento de Metales no Ferreos del Patronato "Juan de la Cierva" de Investigación Técnica.

** Doctor en Ciencias Químicas, Colaborador de la citada Sección de Electroquímica y Corrosión.

En este mismo criterio abunda Larson [18], aunque con márgenes diferentes:

- | | |
|--|------------------------|
| Muy corrosivos, resistencia menor de | 500 $\Omega/cm.$ |
| Corrosivos, resistencia menor de | 500-2 500 $\Omega/cm.$ |
| Ligeramente corrosivos, resistencia superior a | 2 500 $\Omega/cm.$ |

Según Spencer y Lewis [19], estos últimos datos son meramente indicativos, y hay que tener en cuenta que la agresividad en suelos con zonas de agresividad media, de 2 000 a 4 000 $\Omega/cm.$ especialmente, puede estar afectada grandemente por la naturaleza de los suelos adyacentes, por los que también pasa la estructura enterrada.

Otros autores toman como criterio determinante de la agresividad de un suelo, la medida del potencial de oxidación-reducción o potencial Redox. Hadley [20] y Starkey y Wight [21], encontraron que en condiciones anaeróbicas y en presencia de bacterias sulforreductoras, un potencial "Redox" menor a + 100 mV. supone una corrosión moderada que tiende a hacerse muy grande, mientras que para valores de + 400 mV. y superiores la corrosión metálica se hace muy pequeña. Por su lado, Klas y Steinhilber [22], resumiendo los trabajos holandeses [23], han llegado a los valores siguientes:

Para un potencial menor a + 100 mV., muy corrosivo.

Para un potencial comprendido entre + 100 y + 200 milivoltios, moderadamente agresivo.

Para un potencial comprendido entre + 200 y + 400 milivoltios, débilmente agresivo.

Para un potencial mayor de + 400 mV., no agresivo

que tienen la misma magnitud que los encontrados por la escuela americana.

Por otro lado, Lorking [24], estudiando suelos en los que no hay presentes bacterias sulforreductoras y

basándose en los diagramas tensión — pH de Pourbaix [25, 26, 27], ha podido establecer una cierta relación de dependencia entre el potencial "Redox" de un suelo y su carácter agresivo.

Muy recientemente, Leclerc [28] ha expuesto que para suelos con un contenido elevado en sulfuros o sulfatos el valor del potencial "Redox" permite determinar el grado de agresividad del suelo. Define el grado de agresividad de acuerdo con la siguiente escala:

Potencial "Redox" menor de + 100 mV., suelo muy agresivo.

Potencial "Redox" entre + 100 y + 200 mV., suelo agresivo.

Potencial "Redox" entre + 200 y + 300 mV., con agresividad media.

Potencial "Redox" entre + 300 y + 400 mV., débilmente agresivo.

Potencial "Redox" mayor de + 400 mV., no agresivo.

Si bien puntualiza que si los suelos son muy pobres en compuestos de azufre, la interpretación de los resultados se hace muy difícil.

Otra magnitud que se toma como criterio determinante de la agresividad de los suelos es el pH. En este sentido son muchos los autores [29, 21], que han estudiado la relación entre el pH y la agresividad, siendo Klas y Steinrath [22] los que han dado en una tabla, como la siguiente, la escala de agresividad más completa en relación al pH:

pH	Medio	Comportamiento
< 4	Acido muy fuerte.	—
4,0-4,5	Muy ácido.	Muy agresivo.
4,5-5,0	Acido.	—
5,0-6,0	Moderadamente ácido.	—
6,0-6,5	Poco ácido.	Agresivo.
6,5-7,5	Neutro.	—
7,5-8,5	Poco alcalino.	No agresivo.
> 8,5	Muy alcalino.	Condicionado.

Según Leclerc [28], para que un suelo sea no agresivo, el valor del pH debe permanecer dentro de los límites 6-8 y no aumentar con la dilución. Una fuerte acidez o una alcalinidad elevada son, para este autor, unos buenos índices de agresividad. Holler [30] sugirió que la agresividad de un suelo en regiones húmedas podría preverse midiendo su acidez. Denison y Hobbs [15], estudiando una serie de suelos artificiales diferentes, hallaron que la velocidad de

corrosión en los mismos era sensiblemente proporcional a la acidez total de cada uno de ellos.

De lo dicho hasta ahora, y teniendo en cuenta que los suelos son, o pueden, llegar a ser agresivos, se deduce que para evitar la corrosión de un metal enterrado en un suelo haya que tomar las oportunas medidas protectoras.

Las variantes con las cuales se puede contar para evitar el ataque de un metal son:

- a) Cambio del material que rodea la estructura.
- b) Cambio del metal o aleación.
- c) Aislar el metal del medio.

La zanja en la cual se sitúa la estructura metálica debe rellenarse, de ser posible, con un material poroso apropiado, de una granulometría tal que no existan partículas gruesas, como guijarros, que podrían dañar la película protectora que normalmente se da a las estructuras metálicas enterradas, y con una proporción de partículas coloidales de dicho relleno que no sea elevada. Se ha de procurar, asimismo, que el material de relleno sea lo más homogéneo posible.

El cambio de medio que rodea la estructura se puede conseguir colocándola sobre un lecho de ladrillo poroso u otras materias aislantes, que permitan a la lluvia filtrante lixiviar cualquier sal soluble que hubiera en el suelo [31]. La grava que se elegía hace algún tiempo como material apropiado se ha visto recientemente no sirve cuando la estructura metálica corre a través de un suelo arcilloso agresivo.

Para avenar suelos húmedos en los cuales vaya a enterrarse la estructura metálica, el sistema francés recomienda formar un lecho de piedra menuda machacada, para asentar sobre él la estructura [32].

El relleno de las zanjas con arena parece adecuado, siempre y cuando esté libre de sales solubles y de arcilla [31]. La adición de pequeñas cantidades de cal, según el Comité Holandés de Estudio de la Corrosión, da buenos resultados [33, 34].

Logan [35], para el tratamiento del suelo, recomienda: 1.º Adición de productos químicos que neutralicen las propiedades corrosivas del suelo o que aceleren la formación de películas protectoras; 2.º El reemplazamiento del suelo corrosivo próximo a la estructura metálica por suelos menos corrosivos; y 3.º Avenamiento.

Grodsky [36] aconseja rodear el tubo con una capa impermeable y colocar el suelo mezclado con suficiente cal u otro agente que neutralice la acidez del mismo. Wichers [37] sugirió tres métodos de mejorar las condiciones del suelo: 1.º Usar tierra impermeable para las capas superiores de la zanja y avenar en donde sea necesario; 2.º Amasar arcilla plástica o greda alrededor del tubo; y 3.º Rodear la estructura con arena o tierra neutralizadas con cal.

Los recubrimientos de cinc sobre estructuras metálicas enterradas en suelos disminuyen la profundidad de picaduras hasta un 85 por 100, variando mucho

con la clase de suelo y espesor del recubrimiento [38].

Estos recubrimientos se han utilizado sólo en pequeña escala, para prevenir la corrosión de metales enterrados. Entre ellos se ha utilizado en mayor proporción el cinc, aplicado por inmersión en baño fundido [32]. Sin embargo, el cinc se corroe rápidamente en suelos ácidos y alcalinos; en tales casos, es conveniente aplicar un recubrimiento sobre el cinc que sea impermeable y aislante.

La eficacia de un recubrimiento metálico depende, en parte, de su espesor. El potencial del recubrimiento con respecto al del metal base es también importante a causa de la corrosión galvánica que en el seno del suelo puede ocurrir [39].

En los ensayos hechos por Logan en tubos de acero recubiertos con plomo [40], se mostró que, si bien en los primeros años parecía dar resultados prometedores, en aquellos trozos de tubería enterrados durante dieciséis años no se obtuvieron resultados satisfactorios. Esto se debía a que el plomo resulta catódico frente al hierro en la mayoría de los suelos, y que cuando el hierro queda al descubierto en algún punto, tiene lugar la corrosión del mismo.

Interesa también conocer *a priori* el comportamiento de un recubrimiento metálico. Burns y Schuh [51] han descrito un número de ensayos que sirven a tal fin y que pueden clasificarse en: 1.º Ensayos de desgarnecido, en los cuales la pérdida de peso del metal recubierto se determina después de arrancar el recubrimiento; 2.º Ensayos de disolución, en los cuales se determina el tiempo requerido para que aparezca el orín, cuando el metal férreo recubierto está sujeto a la acción de soluciones o niebla corrosivas; 3.º Ensayos electrolíticos, en los cuales la corriente pasa desde el metal recubierto a un papel en el cual se precipita el anión del metal recubierto; 4.º Ensayo de la secante; este método implica cortar el recubrimiento sobre una superficie curva con una lima plana o sobre una superficie lisa con una rueda de esmeril de precisión y medir la anchura de la secante expuesta. El espesor es $C^2/8R$, donde C es la anchura de la secante y R es el radio de la superficie o de la rueda. Su exactitud es, aproximadamente, ± 10 por 100 para recubrimientos hasta 0,005 mm. Estos ensayos, con la excepción del electrolítico, son destructivos y su utilidad está limitada principalmente al trabajo de investigación.

El cambio del metal o aleación que forma la estructura por otro, no siempre puede llevarse a cabo, ya que unas veces no resulta apropiado y, en otras ocasiones, el precio del nuevo metal o aleación puede hacer totalmente prohibitivo su empleo para dicho menester.

Entre los ensayos de diferentes materiales enterrados en suelos y sometidos a corrosión, merecen destacarse los de Logan [42], Denison y Romanoff [43] y Hudson y Acock [44].

Las aleaciones férricas comúnmente utilizadas en tuberías se corroen aproximadamente a la misma ve-

locidad [45]. En algunos suelos, el hierro forjado tiene una tendencia a corroerse más uniformemente o mostrar una penetración media ligeramente más baja que otras aleaciones férricas. En unos cuantos suelos alcalinos, el hierro fundido parece tener una velocidad de penetración algo más elevada. Las diferencias, sin embargo, son poco acusadas. Los metales férricos pueden hacerse más resistentes a la corrosión mediante adición de ciertos elementos de aleación, como cobre, cromo, níquel. Se ha hallado, no obstante, que pequeñas adiciones de estos elementos no afectan la velocidad de corrosión del metal base.

Otra clase de sistema que se utiliza para proteger un metal enterrado es el de aislar eléctricamente la estructura metálica del suelo corrosivo que la rodea. Principalmente esto se consigue mediante recubrimientos bituminosos, hormigón o mortero hechos con cemento Portland. Las pinturas al aceite de linaza no son recomendables en aquellos casos en que el suelo donde va a permanecer la estructura esté húmedo la mayor parte del tiempo; sin embargo, algunas pinturas a base de derivados de caucho o de resinas sintéticas estables, son más duraderas en tales condiciones [32].

En los casos en que la naturaleza de un suelo sea tal que se adhiera al recubrimiento, el suelo puede llegar a estar tan firmemente sujeto que, cuando al secarse haya contracción, el recubrimiento se cuarte. Las distorsiones más frecuentes tienen lugar por presiones irregulares del suelo [46]. Sobre este particular, Scott [47] ha estudiado diversos recubrimientos bituminosos.

Para remediar este inconveniente se utiliza un material recubrente más rígido y más fuerte, tal como alquitrán o esmalte asfáltico de alto punto de fusión, o bien una mezcla de arena y asfalto o cemento Portland, y también proteger el recubrimiento bituminoso con una camisa rígida, tal como una hoja de acero. Parece ser que la mayor parte de los daños que tienen lugar por la contracción del suelo ocurren en los primeros meses después de rellenar la zanja [48].

Las pinturas a base de alquitrán son bastante útiles en suelos moderadamente corrosivos, y para los casos en que se requiera protección duradera de la estructura se deben aplicar en tres capas, dejando secar cada una de ellas antes de aplicar la siguiente.

Las capas de imprimación, que consisten esencialmente de alquitrán o asfalto disuelto en un disolvente volátil, son mucho menos duraderas que las pinturas al aceite. La pintura ideal para usar como imprimación para subsiguiente recubrimiento bituminoso, ha de tener las siguientes propiedades: fuerte adherencia al metal y a los betunes; buena resistencia eléctrica y carencia de poros; resistencia a la acción del agua subterránea alcalina o ácida; no se debe agrietar o levantarse bajo impacto, y debe resistir bien a la abrasión propia del uso.

De los resultados de Logan [49] sobre ensayos de recubrimientos bituminosos, basándose en la pro-

fundidad de picaduras referidas al picado en el tubo desnudo, se deduce: 1.º Que el factor más destructivo con recubrimientos bituminosos es la tensión del suelo. 2.º Recubrimientos muy delgados, tales como emulsiones asfálticas y pinturas, tienen poco valor protector. 3.º El reforzado con amianto mejora notablemente la protección anticorrosiva. 4.º Las capas de asfalto de espesor mayor de 10 mm. tienen las mejores propiedades. 5.º Generalmente, cuanto más grueso es el recubrimiento, mejor es el grado de protección conseguido. Los recubrimientos bituminosos reforzados deben tener, al menos, 3 mm. de espesor. Pearson [50] ha estudiado también estos mismos tipos de pinturas bituminosas.

Los recubrimientos que tienen como base alquitrán o betún, pueden servir para proteger la estructura de la corrosión en condiciones poco adversas, o bien como capa de imprimación [50]. Para obtener una capa bituminosa gruesa sobre la estructura metálica es necesario añadir un material de relleno apropiado, como tierra de infusorios, pómez, amianto, talco, mica o polvo de pizarra [51]. Logan [49] recomendaba el refuerzo del material bituminoso mediante adición de amianto, y, por otro lado, Thomas [52] se inclinaba por el uso de polvo de caliza.

Cuando el material bituminoso se trata en caliente, haciendo pasar aire a su través, se consigue elevar su punto de reblandecimiento [53], y ello da lugar a mejores propiedades del recubrimiento obtenido posteriormente.

Spencer [54] enumeró las características que debe tener un recubrimiento para proteger la parte externa de las tuberías enterradas:

- a) Facilidad de aplicación.
- b) Buena adherencia al metal.
- c) Resistencia al impacto.
- d) Flexibilidad.
- e) Resistencia a la contracción del suelo.
- f) Resistencia al flujo.
- g) Resistencia al agua.
- h) Resistencia eléctrica elevada.
- i) Estabilidad química.
- j) Resistencia a las bacterias.

Han sido muchos los ensayos sobre recubrimientos bituminosos que se han hecho, utilizando voltajes elevados, para detectar poros y otras discontinuidades [55, 56, 57, 58, 59].

Otro tipo de protección, que se emplea en casos de suelos muy agresivos, es aquel que utiliza cemento Portland para los recubrimientos de estructuras enterradas. Speller [60], describe el empleo de mortero de cemento y arena en terrenos pantanosos. Se ha visto que el cemento aluminico no siempre resulta apropiado en algunas clases de terreno [61].

El carácter del mortero de cemento Portland, en agua o suelo húmedo, depende grandemente del mantenimiento de una película de agua alcalina en con-

tacto con el metal y también de la muy baja velocidad de difusión del oxígeno disuelto a través del cemento. Los recubrimientos de cemento no se pueden utilizar en aquellos sitios donde el suelo contiene sales o álcalis que lo ataquen [62].

Para asegurar un buen servicio de tuberías de hierro y acero en suelos corrosivos, durante un período largo de tiempo, los requisitos principales son, según Speller [63]: 1.º Aplicación apropiada de un recubrimiento bituminoso reforzado sobre el metal limpio y seco. 2.º Detección y reparación de poros en el recubrimiento. 3.º Preparación de la zanja con suelo uniforme; 4.º Inspección eléctrica para revelar cualquier punto anódico. 5.º Protección catódica.

De la observación de los requisitos anteriores y de la práctica adquirida con el tiempo por los especialistas en protección contra la corrosión, se llega a la conclusión de que el criterio más económico y práctico de proteger una estructura metálica enterrada es el de aplicarle el adecuado recubrimiento y ofrecerle luego la protección catódica, como defensa de los puntos débiles de aquél.

La protección catódica consiste, en definitiva, en la utilización de una corriente continua que hace actuar a la estructura metálica como cátodo de la correspondiente pila, con lo cual la velocidad de corrosión queda reducida o eliminada.

Un sistema de protección catódica consiste en: una fuente de energía eléctrica que suministra la corriente continua necesaria; una estructura metálica que se trata de proteger polarizándola catódicamente; un ánodo que pueda ser soluble o inerte; y una serie de resistencias diversas que comprenden la del electrólito-suelo, las de contacto electrodo-electrólito, aquellas otras de los conductores y las de los electrodos [64].

En el caso de estructuras enterradas en suelos, las resistencias del electrólito y de contacto electrodo-electrólito pueden ser bastante grandes, siendo ellas las que regulan la intensidad de la corriente que pasa a través del circuito eléctrico, ya que las otras resistencias intercaladas en serie con dicho circuito suelen ser relativamente bajas comparadas con las primeras.

Atendiendo a su origen existen dos tipos de protección catódica, según que proceda la corriente de una *fuentes externa* (rectificador, dinamo, batería) o de una *interna* (ánodos galvánicos). En el primer caso se emplean indistintamente ánodos inertes o solubles, utilizándose para estos últimos materiales considerados como chatarra. En el segundo caso, la protección catódica se basa en emplear como generador de la corriente, ánodos solubles, metales o aleaciones cuya posición en la tabla de las fuerzas electromotrices, precio y condiciones específicas sean suficientemente favorables para permitir la aplicación de la protección catódica. Entre los ánodos galvánicos de sacrificio que se han empleado con profusión se encuentran los metales magnesio, cinc y aluminio, y algunas aleaciones de los mismos.

Existen muy diversos criterios para el empleo de

un sistema u otro de protección catódica y de la clase de ánodos que se han de utilizar en cada caso específico.

En lo que respecta a los sistemas de corriente impresa, para proteger catódicamente a una estructura metálica enterrada en un determinado suelo, hace falta un cuidado permanente de la instalación y del suministro de energía eléctrica e, igualmente, disponer de espacio para emplazar las estaciones de suministro y control de energía eléctrica correspondiente. Este tipo de protección encuentra su empleo más difundido en campo abierto (oleoductos, conducciones de agua potable a poblaciones, etc.). La capacidad y potencia de la fuente de energía eléctrica dependerá de la cantidad que de ella se requiera a fines de protección.

Prítula [65], para necesidades grandes de corriente, 1,5 a 5,7 Kw. o más, recomienda generadores movidos por motores eléctricos, de gas o diesel; para necesidades medias, 0,5 a 1,5 Kw., recomienda dinamos movidas por motores de petróleo o molinos de viento y también rectificadores; para consumos pequeños, 50 a 500 W., rectificadores, generadores movidos por el viento o acumuladores; y para consumos muy pequeños, 10 a 100 W., recomienda el uso de un rectificador o bien de un acumulador.

La separación entre los ánodos, a lo largo de la estructura yacente en el terreno, depende de la resistividad del suelo y de la resistencia estructura-suelo. Otra variante es la distancia entre los ánodos y la estructura que se pretende proteger; cuanto menor sea la separación, más próximos se habrán de colocar los ánodos entre sí [66]. El potencial de la estructura, respecto al electrodo de referencia (Cu/Cu SO₄ sat.), debe mantenerse, cualquiera que sea el sistema de protección catódica utilizado, por encima de — 0,85 volt., o de — 0,95 volt. si se supone la existencia de bacterias sulfurreductoras en el terreno.

En algunos casos de protección catódica por corriente impresa interesa colocar los ánodos, especialmente los de chatarra de hierro, en lechos de carbón o coque, cuando el terreno es poco conductor, ya que de esta forma se reduce la resistencia ánodo-suelo. Por su parte, los ánodos de grafito tienen el inconveniente de reaccionar con el oxígeno que se desprende en ellos atacándose y llegando a veces a desmoronarse en un tiempo relativamente corto.

Los sistemas de protección catódica en que se utilizan ánodos galvánicos son especialmente indicados en la protección de redes urbanas de distribución, pues las limitaciones intrínsecas de potencial de los propios ánodos, eliminan el peligro de la posible corrosión de estructuras metálicas vecinas. El empleo de una u otra clase de ánodos galvánicos dependerá de varios factores: resistencia eléctrica y composición química del suelo, pH, etc. Para una resistencia menor de 4 000 Ω /cm. puede utilizarse el cinc [67]; mientras que para resistencias no superiores a 8.000 Ω /cm. pueden emplearse magnesio y aluminio.

El único metal de los acabados de mencionar, que

se emplea en estado puro, sin alea, es el cinc; sin embargo, es norma establecida por muchos investigadores, utilizar una aleación de magnesio conteniendo 6 por 100 de aluminio, 3 por 100 de cinc y 0,2 por 100 de manganeso; y en el caso del aluminio, emplear una aleación al 5 por 100 de cinc. El motivo de alea el magnesio y el aluminio se debe a que tales metales puros tienden a hacerse pasivos cuando llevan cierto tiempo trabajando como ánodo, debido a la formación de una película de óxido sobre el metal, la cual le aísla del medio.

Por otro lado, para aumentar el rendimiento en corriente del ánodo de sacrificio y obtener una densidad de corriente elevada, es necesario rodearlo con un lecho especial. Este lecho, que es un verdadero anolito, debe cumplir los tres objetivos siguientes [68]:

1.º Reducir la resistencia ánodo-tierra, de modo que pueda suministrar más corriente.

2.º Estabilizar la tensión anódica; evitar la polarización y conseguir una fuente de corriente más segura.

3.º Mejorar el rendimiento de corriente, reduciendo la autocorrosión y permitiendo un ataque anódico más uniforme y mejor repartido.

Se han utilizado muchos productos para formar estos lechos envolventes de los ánodos de sacrificio, pero las mezclas casi siempre consistían en bentonita o arcilla y yeso como materiales fundamentales, añadiéndoles, a veces, otras substancias: sulfato sódico, sulfito de magnesio, etc. De los estudios hechos por Osburn y Robinson [69] y Wahlquist y Fanett [70], sobre lechos de relleno diferentes, se puede observar que las mezclas de bentonita o arcilla y yeso dan valores de rendimiento de corriente para el magnesio y cinc del 53 y 92 por 100, respectivamente. Por otro lado, Laque [71] da para el cinc, el magnesio (6 por 100 de Al, 3 por 100 de Zn y 0,2 por 100 de Mn) y aluminio, los rendimientos de corriente del 90, 60 y 50 por 100, respectivamente. Como regla general, puede decirse que cuando se trata de mezclas recubiertas de ánodos con buena conductividad, como aquellos casos en los que se emplea la mezcla bentonita-sulfito de magnesio o bentonita-yeso-sulfato sódico, se obtiene una salida de corriente mayor que en los casos de utilizarse mezclas menos conductoras, como por ejemplo, la de bentonita-yeso. Cualquiera que sea el anolito a utilizar, hay que preparar una masa con agua de tal forma que la pasta se adhiera íntimamente al ánodo. El mejor sistema es utilizar, para tal efecto, sacos especiales dentro de los cuales se hallan el ánodo y la masa de relleno correspondientes.

Los ánodos de sacrificio que han alcanzado mayor difusión para la protección catódica de estructuras metálicas enterradas, han sido: el cinc y la aleación de magnesio más arriba reseñada. El empleo de unos u otros dependerá de factores técnicos y económicos, pues, por ejemplo, desde el punto de vista del rendimiento en corriente es recomendable el cinc; sin embargo, el número de conexiones a establecer será nor-

malmente mayor que en el caso del magnesio [68]. Atendiendo a los precios actuales en España de los metales puros, sin manufacturar, que se emplean como ánodos de sacrificio en protección catódica y al rendimiento en corriente de los mismos, se puede deducir el precio resultante por amperio/hora suministrado:

Metal	Ptas. / Kg.	Rendimiento en corriente — %	Ah / Kg. Teóricos	Ptas. / 1000 Ah
Zn	16,73	90	820	23,00
Mg	85,00	60	2210	64,00
Al	37,45	50	2980	25,00

Como puede verse por la tabla que se acaba de reseñar, el cinc es el que resulta más económico a igual cantidad de corriente suministrada.

El rendimiento en corriente para el magnesio, indicado en la tabla, corresponde a la aleación de magnesio, 6 por 100 de aluminio, 3 por 100 de cinc, 0,2 por 100 de manganeso. El precio no se ha indicado para tal aleación y se ha supuesto que varía poco con respecto al de magnesio puro.

Pese a que el cinc es el metal más barato para utilizarlo como ánodo de sacrificio, a veces, como se ha indicado más arriba, interesará emplear otro que dé mayor salida de corriente inicial, ya que se ha visto [72] que la densidad de corriente necesaria para proteger catódicamente una estructura metálica es elevada en los comienzos de la protección, bajando luego, en el transcurso del tiempo, hasta valores muy pequeños. Si la densidad de corriente inicial no es suficiente para alcanzar un valor de potencial protector, puede darse el caso de que tarde mucho tiempo en lograrse éste, con lo cual, y hasta entonces, habrá estado sometida la estructura a corrosión en lugar de hallarse pro-

tegida, y en dicho transcurso han podido formarse picaduras profundas, peligrosas.

Una buena visión de conjunto, en lo que concierne a protección catódica, se consigue comparando los diagramas tensión-pH de Pourbaix para el metal a proteger y aquellos otros correspondientes a los ánodos de sacrificio [68]. Por lo tanto, para que tenga lugar la protección de un metal por ánodos de sacrificio, el potencial que impongan estos últimos sobre el primero ha de tener un valor tal que se encuentre, en el diagrama de Pourbaix correspondiente, dentro de la zona de inmunidad del metal a proteger, o en otras palabras, que se consiga rebajar el potencial de la estructura metálica a valores más electronegativos que el correspondiente potencial mínimo protector anteriormente enunciado.

Sin embargo, la posición de un metal en la tabla de F.E.M. varía bastante, según sea la naturaleza del medio y el pH del mismo, como han visto Mears y Brown [73], y Raclot [74]. Por ello, un metal que en un determinado medio es más electronegativo que otro, puede serlo menos en otro medio circundante. Debido a esto, será conveniente hacer un estudio del terreno y del comportamiento de los ánodos reactivos frente al mismo, antes de dictaminar qué clase de ánodos será la más conveniente a emplear en la protección catódica.

Se ha hablado ya de los ánodos de sacrificio, pero no se ha dicho nada referente a la proporción de impurezas que como máximo pueden tolerar. En líneas generales, los ánodos empleados deberán contener la menor cantidad posible de aquellos elementos que posean una baja sobretensión para el hidrógeno (hierro, níquel, etc.), ya que éstos darán lugar a bajos rendimientos en corriente debido a la autocorrosión, por la existencia de micropilas en el ánodo. Por contra, existen otros elementos de aleación que mejoran las propiedades del metal base; tal ocurre en la aleación de magnesio: 6 por 100, aluminio; 3 por 100, cinc, y 0,2 por 100, manganeso; o en aquella otra de aluminio: 5 por 100, cinc.

(Continuará.)