

INFLUENCIA DE LA CORROSION BIOLÓGICA EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA TIERRA ARMADA

MARIA TERESA GARCIA MATEOS (*)

JOSE MARIA MUÑOZ CEBRIAN (**)

RESUMEN. El fenómeno de alteración de algunas rocas conteniendo sulfuros de hierro, fundamentalmente pirita, marcasita y pirrotita, viene creando serios problemas en obras de ingeniería civil desde hace bastante tiempo debidos a un proceso de oxidación de origen biológico en el que se produce ácido sulfúrico, producto muy agresivo para todo tipo de estructuras. Por otra parte, estos materiales están muy extendidos por el norte de España y en otras zonas de nuestra geografía.

En las estructuras de Tierra Armada en que se emplea como material de relleno este tipo de materiales pueden producirse problemas de corrosión de las armaduras metálicas por este fenómeno biológico.

En el presente trabajo se ha simulado de forma acelerada el efecto corrosivo de los materiales de relleno empleados en algunas zonas de la Autopista Vasco-Aragonesa frente a muestras de armadura de acero inoxidable enterradas en los mismos en condiciones especiales. Se ha podido estimar la corrosión a largo plazo de las armaduras enterradas en estos suelos, alcanzando en diez meses el grado de corrosión producido en siete años en condiciones reales de servicio, demostrando, asimismo, el origen biológico de estas alteraciones.

ABSTRACT. *In this work it has been simulated the corrosiveness of the fill containing iron sulphides employed in Earth Reinforcement on steel strips buried in. It has been estimated the long-time corrosion causing in ten months the same corrosion grade reached after seven years in field conditions, proving the biological cause of this alterations.*

1. INTRODUCCION

Las obras de sustentación de Tierra Armada se utilizan cada vez más en ingeniería civil y la gran preocupación sobre la durabilidad de sus armaduras metálicas se refleja en diferentes trabajos (Darbin, M.; Jalloux, J.; Montuelle, J., 1979, 1980 y 1986). Ahora bien, pocos de ellos tratan el problema de la corrosión debida a fenómenos biológicos, aspecto que cae dentro del campo de la actual Biotecnología Ambiental, debido a la escasez de trabajos acerca de la biodeterioración en la ingeniería civil y casi ausente en el caso de la Tierra Armada (Muñoz Cebrián, J. M., 1981 y 1987).

Por ello, el objetivo de este trabajo ha sido estudiar la alteración de las armaduras metálicas empleadas en obras de Tierra Armada como consecuencia de la actividad microbiana desarrollada en los materiales de relleno e intentar valorar la importancia de este fenómeno en algunas zonas de la autopista Vasco-Aragonesa.

El problema de la agresividad de los suelos a los materiales de construcción y más concretamente, el de la corrosión de los materiales metálicos, no es un tema nuevo y ha sido estudiado en canalizaciones, depósitos y otras estructuras enterradas en diferentes tipos de suelos. En el caso de los suelos estudiados en este trabajo, su característica fundamental es contener sulfuros de hierro, fundamentalmente pirita y pirrotita, los cuales vienen creando serios problemas en ingeniería civil desde hace tiempo. Una de las causas es el efecto producido por el desarrollo de microorganismos del ciclo del azufre. La oxidación bacteriana del sulfuro de hierro determina la producción de ácido sulfúrico y por tanto la solubilización de hierro reducido (Fe^{2+}). Esto conlleva la acidificación de las aguas de drenaje que junto con su efecto nocivo para el medio ambiente, resultan altamente corrosivas para los materiales metálicos que forman la estructura de Tierra Armada.

En la primera parte del trabajo se describe el estudio microbiológico de las muestras analizadas para su diagnóstico bacteriana. En la segunda parte se recoge el trabajo experimental llevado a cabo para valorar la agresividad de los suelos estudiados sobre unas pletinas de acero galvanizado de las empleadas en este tipo de obras.

(*) Licenciada en Ciencias Biológicas. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPU).

(**) Doctor en Ciencias Biológicas y licenciado en Ciencias Químicas. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPU).

2. EL PAPEL DE LAS BACTERIAS DEL CICLO DEL AZUFRE EN EL FENOMENO DE LA CORROSION

2.1. EFECTOS PRODUCIDOS

El efecto de las bacterias sulfooxidantes y reductoras de sulfatos en la corrosión de materiales metálicos, ha sido ampliamente estudiado (Miller, 1971; Booth, 1961; Escario, Dapena, Muñoz y Martín, 1976); sin embargo, la mayoría de la información, así como los mecanismos fisicoquímicos están limitados al acero y al hierro fundido, por ser los metales más utilizados en la fabricación de tuberías enterradas. Con el desarrollo de la industria química y petroquímica, se han necesitado nuevas aleaciones resistentes a la corrosión, como el acero inoxidable y aleaciones de níquel, encontrándose nuevos casos de corrosión por picadura de estos materiales debida a una intensa actividad biológica en cambiadores de calor refrigerados por las aguas contaminadas, así como importantes grietas de corrosión en aceros inoxidables que formaban las juntas de una torre de refrigeración, la cual era alimentada por un río que contenía altas concentraciones de bacterias del hierro y reductoras de sulfatos. También se citan casos de corrosión tipo picadura en acero galvanizado en una torre de refrigeración, habiéndose detectado altos contenidos de bacterias sulfooxidantes y reductoras de sulfatos.

Uno de los tipos más corrientes de corrosión de origen microbiano es el debido a la producción de ácido sulfúrico a partir de compuestos de azufre reducidos por organismos autótrofos quimiolitótrofos, como son los tiobacilos. Además hay que tener en cuenta también que dichas bacterias pueden formar compuestos sulfurosos metaestables en ambientes tanto aeróbicos como anaeróbicos, cuyo papel corrosivo puede ser importante.

Los estudios realizados con bacterias del tipo de *T. thiooxidans* indican que además del ácido sulfúrico se produce un efecto acelerante de la corrosión en ciertos tipos de aleaciones.

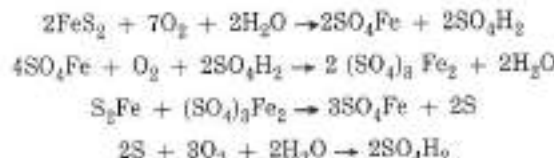
De todas formas, los conocimientos que se tienen hasta la fecha indican que los problemas de corrosión microbiana están ampliamente distribuidos en la industria y aunque en muchos casos no existe una documentación precisa, no hay duda sobre el papel agresivo y la estimulación de la corrosión por microorganismos.

2.2. MECANISMOS

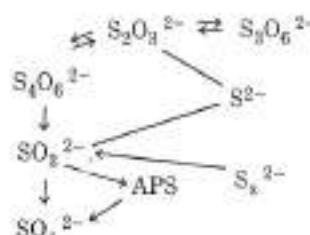
La corrosión de metales en medios acuosos es un fenómeno fundamentalmente electroquímico que puede ser iniciado o acentuado por los microorganismos, debido a sus actividades metabólicas.

Uno de los tipos de corrosión microbiana es la causada por bacterias sulfooxidantes aeróbicas, debido a su capacidad de producir ácido sulfúrico. Pertenecen a este grupo, los tiobacilos, presentes en suelos y aguas que contienen compuestos de azufre reducido.

Las reacciones químicas de oxidación de los materiales conteniendo pirita, piroclita, etc., son:



Un esquema de todos los pasos de la oxidación microbiológica del azufre inorgánico ha sido propuesto por Kelly (1982).



La oxidación de compuestos sulfurosos puede realizarse tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas.



Dentro de la amplia variedad de microorganismos que oxidan compuestos sulfurosos, algunos tiobacilos termófilos toleran temperaturas hasta 55-60 °C, y otros requieren un pH bajo entre los que se incluyen *T. thiooxidans*, *T. ferrooxidans* y *T. acidophilus*, siendo frecuente encontrarlos en residuos industriales de azufre, en aguas ácidas de minas, en escombreras de minerales de hierro, en rocas conteniendo sulfuros de hierro, etc., donde la producción biológica de ácido sulfúrico es difícil de limitar.

3. MATERIAL Y METODOS

3.1. MATERIAL ESTUDIADO

El material estudiado está formado por seis muestras, tres de agua y tres de suelos, recogidos en una zona de construcción de muros de Tierra Armada.

CONSTRUIMOS SOLUCIONES

Obras que identifican nuestra forma de trabajar y califican la larga trayectoria de nuestra empresa.

Construimos grandes realidades que son el fruto de la técnica y la experiencia acumulada a lo largo de los años.

Así somos y así seguiremos construyendo futuro.



FOMENTO
DE OBRAS Y CONSTRUCCIONES S.A.

AVANZAMOS EN FIRME

Desde hace más de 60 años, COMPOSAN, S.A., avanza en firme aplicando a sus productos la más alta tecnología.

Cada vez son más los pavimentos asfálticos que llevan nuestros productos como base de su firmeza y calidad. Por ello, cada vez es mayor la confianza que los clientes tienen en nuestra Empresa.

Para nosotros, avanzar en firme es nuestro objetivo: en tecnología, en calidad y en servicio al cliente.



COMPOSAN

Tecnología viva

3.1.1. Localización de las muestras de estudio.

Todas las muestras fueron recogidas en la autopista Vasco-Aragonesa y conservadas en frigorífico a 5 °C.

A. MUESTRAS DE AGUA

- A-1. Terraplén de Eulogio; km = 26,4. C.D. Exterior.
- A-2. Terraplén Miravalles; cono del estribo número 2 del viaducto; km = 7,5. C.D. Exterior.
- A-3. Desmonte de Miravalles; km = 7,5. C. Interno.

B. MUESTRAS DE SUELO

- S-1. Desmonte de Ulpiano; km = 33,5. C.D. Interno.
- S-2. Desmonte de Miravalles; km = 7,5. C.I.
- S-3. Desmonte de Miravalles; km = 7,5. C.I.

3.1.2. Características de las muestras

A. MUESTRAS DE AGUA

- A-1. Agua amarillo-clara, inodora, turbia (+ +) y con abundante precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$; pH = 3,5.
- A-2. Agua marrón-naranja, inodora, turbia (+ + +) y con abundante precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$; pH = 3,5.
- A-3. Agua claro-verdosa, inodora, poco turbia (+) y con poco precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$; pH = 3.

B. MUESTRAS DE SUELO

- S-1. Suelo de pizarra de tamaño medio, con algunos trozos de gran tamaño. Color gris-negruzco, muy compacta y alguna mancha de óxidos de hierro. Al dispersarlo en el suero fisiológico, color gris negruzco; pH = 5.
- S-2. Suelo de pizarra, color gris, de tamaño grueso. Al romperse se exfolia fácilmente. Muy oxidada (grandes superficies amarillentas) e incluso por dentro amarillo-azulada. Humedad (+). Se ven los planos de exfoliación alrededor de granos más gruesos; pH = 2,5.
- S-3. Suelo de pizarra gris-negruzco-amarillento. Menos compacta que la muestra S-1 y más que S-3. También patentes los planos de exfoliación. Con el suero fisiológico, color verdoso-grisáceo. Humedad (+ +); pH = 5.

3.2. METODOLOGIA DE TRABAJO

Las fases seguidas en el desarrollo del estudio de las muestras han sido:

- Preparación de los medios de cultivo: las bacterias pertenecen al ciclo del azufre, de ahí que se siguió el trabajo de Postgate (1978), para la preparación de dichos medios, los cuales posteriormente se inocularon con las diferentes muestras.
- Diagnóstico bacteriano o identificación de las bacterias aisladas de las muestras.
- Aplicación experimental: consiste en una serie de ensayos acelerados de laboratorio del efecto corrosivo de los microorganismos presentes en las muestras sobre las armaduras de acero galvanizado.

3.2.1. Cultivo de bacterias

1. PREPARACION DE LOS MEDIOS DE CULTIVO

Las bacterias que se pretende estudiar en estas muestras pertenecen al grupo de los *Thiobacillos* sulfooxidantes. Por ello, los medios específicos empleados para su aislamiento son: el medio S y el medio F.

Composición del medio S (Starkey's, Vischniac y Santer's)

$\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	5 g
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3 g
$\text{K H}_2\text{PO}_4$	3 g
Ca Cl_2	0,25 g
Mg SO_4	0,5 g
$\text{Fe SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10 mg
Solución de oligoelementos	1 ml
Agua corriente	1 l

Composición del medio F (Leathen)

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,25 g
KCl	0,05 g
$\text{Mg SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,5 g
$\text{K H}_2\text{PO}_4$	0,05 g
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0,01 g
Agua corriente	1 l
Solución de oligoelementos	1 ml

Posteriormente, se añade 20 ml de $\text{Fe SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (10 % de Fe SO_4); pH = 5.

2. INOCULACION DEL MATERIAL BIOLÓGICO

Se repartieron ambos medios de cultivo en tres series de matraces erlenmeyers (250 ml) a razón de 200 ml, respectivamente, para inocular los siguientes tipos de muestras:

2.1. Muestras de agua

Se inoculan los matraces con 10 ml de cada muestra, previamente agitadas, repitiéndose la operación dos veces.

2.2. Muestras de suelo original

Se inoculan los matraces con 10 ml de cada muestra, las cuales fueron preparadas con 5 g de suelo diluido en 60 ml de suero fisiológico (NaCl 9 %), repitiéndose igualmente dos veces para cada muestra.

2.3. Muestras de suelo después del trabajo experimental

Con las muestras de suelo procedentes de la aplicación experimental que se describe en el apartado 3.2.3. se inocularon los matraces siguiendo el mismo procedimiento que en el caso anterior.

3. INCUBACION

Se incubaron las series de matraces en un incubador orbital a una temperatura de 28 °C y a 150 rev/min, to-

mando nota de la variación del pH y de la turbidez de las muestras, diariamente.

A los 15 días, se apreció en casi todas las muestras un abundante crecimiento de bacterias por el aumento de la turbidez y disminución del pH hasta valores aproximados de 2, debido a la producción de SO_4H_2 , resultante del metabolismo bacteriano.

3.2.2. Diagnóstico bacteriano. Consiste en la identificación de bacterias, siguiendo el manual de Bergey (1974) y ASTM STP 650 E1NER (1979), tanto para las muestras de agua y suelo originales como para las muestras de suelo después del trabajo experimental.

Tras detectar la disminución de pH y aumento de la turbidez de los matraces y con objeto de aislar las bacterias desarrolladas para su posterior caracterización, se inoculó con 1 cc de cada muestra respectivas placas Petri, conteniendo los mismos medios específicos de cultivo pero solidificados con 1,5 % de agar.

Después de incubadas en la estufa a la temperatura de 28 °C durante 14 días y observar el crecimiento de las colonias se hicieron diferentes preparaciones con tinción de Gram para estudiar su morfología y características para su posterior identificación.

Dado el carácter del trabajo, fundamentalmente técnico-experimental, no se han realizado pruebas bioquímicas especiales para la clasificación de los microorganismos.

3.2.3. Aplicación experimental. Consiste en una serie de ensayos de los materiales enterrados para valorar el efecto de la agresividad del suelo y siguiendo un dispositivo específico (Jaton, 1974) que permite definir la correlación entre la corrosión del material que constituye las armaduras metálicas de la Tierra Armada y la actividad microbiana. Es decir, intentar simular los ataques previsibles a que va a estar sometido el material y su realización de forma acelerada, de modo que permitan prever sus efectos a largo plazo.

Para observar el efecto corrosivo del suelo biológicamente activo empleado como material de relleno en las estructuras de Tierra Armada estudiadas, sobre dichas armaduras metálicas, se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio.

Se establecieron cuatro series de ensayos introduciendo trozos de pletina previamente medidas y pesadas, para cada una de las tres muestras de suelo (500 g), colocadas en tientos y en las siguientes condiciones:

1. Suelo previamente esterilizado por el calor seco a 180 °C más agua corriente. Pletinas 1, 5 y 9.
2. Suelo en condiciones naturales más agua corriente. Pletinas 2, 6 y 10.
3. Suelo en condiciones naturales más medio de cultivo. Pletinas 3, 7 y 11.
4. Suelo en condiciones naturales más agua procedente del drenaje del terreno. Pletinas 4, 8 y 12.

Periódicamente y hasta un tiempo de 12 meses, se determinó el pH del suelo de las series de ensayo, así como el estado de las pletinas, manteniendo las muestras en condiciones constantes de humedad y temperatura.

El grado de corrosión de las pletinas se evaluó por observación visual y microscópica, así como midiendo la pérdida de peso y transformándola en disminución del espesor medio suponiendo la corrosión uniforme.

Las ventajas de este ensayo acelerado son:

1. Los resultados se obtienen a corto plazo.
2. El empleo de medios específicos hacen que las condiciones de trabajo puedan ser controladas y la corrosión bacteriana pueda desarrollarse fácilmente.
3. Como la pletina de acero galvanizado no se introduce totalmente en el suelo, la parte atacada del material puede compararse con la original no alterada.
4. El hecho de que la temperatura de incubación fuese constante a 28 °C y el grado de humedad mantenido durante toda la duración del ensayo, hace que la biodegradación sea acelerada y permita extrapolar el comportamiento de los materiales a largo plazo.
5. El empleo de tientos para contener las muestras ha permitido unas condiciones de humedad, drenaje y aireación semejantes a las que se dan en el terreno natural.
6. La duración establecida para el ensayo parece que es suficiente para poder sacar conclusiones fiables.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS SUELOS

Se determinaron una serie de características de los suelos una vez terminado el período de ensayo para cuantificar las propiedades fisicoquímicas que se consideran más importantes para juzgar la corrosividad frente a materiales metálicos enterrados.

Los valores de contenidos en materia orgánica, sulfatos y cloruros se han obtenido sobre el material inferior al tamiz 2 mm UNE; los citados valores no tienen en cuenta las posibles correcciones por partículas superiores a dicho tamaño existentes en las muestras. Los valores del pH se determinaron sobre las aguas de drenaje y los de resistividad sobre la muestra total del suelo ensayado (Tabla 1).

No se ha llegado todavía a un acuerdo completo sobre los valores que deben establecerse para los parámetros que juzgan la corrosión de los materiales metálicos enterrados, aunque sí un orden de magnitud aceptado para establecer unos valores críticos (Tabla 2).

4.1.1. Cloruros. La concentración de cloruros es bastante constante en todas las muestras de suelos, oscilando entre 0,02 y 0,01 %, de ahí que por encontrarse en el intervalo $\geq 0,01$ % estas propiedades puede definir el suelo como regular para la corrosividad frente al acero galvanizado.

CARRETERAS Y AEROPUERTOS

SUELOS	MUESTRAS PLETINAS	CLORUROS %	SULFATOS %	MAT. ORG. TOTAL %	pH		RESISTIVIDAD $\Omega \cdot \text{cm}$
					AGUA	SUELO	
1	1	0,02	0,1	3,2	5	3	1770
	2	0,02	TRAZAS	3,4	5	2,5	2240
	3	0,01	0,1	3,3	5	3,5	2110
	4	0,01	0,1	3,5	5	2,0	2330
2	5	0,01	TRAZAS	2,0	5	5	6510
	6	0,02	0,1	2,2	5	4,5	3690
	7	0,02	0,2	1,9	6	5,0	3580
	8	0,02	0,2	2,2	5	4,5	5900
3	9	0,01	0,2	2,6	3	2	2270
	10	0,01	0,2	2,1	5	2	2200
	11	0,02	0,3	1,7	5	3	1560
	12	0,02	0,2	1,3	3	3,5	4190

TABLA 1. Propiedades físico-químicas de las muestras de ensayo de suelos.

RESISTIVIDAD ($\Omega \cdot \text{cm}$)	> 5000 2000-5000 < 2000	Buena Regular Mala
CLORUROS (mg/kg)	> 100 (0,01 %)	Regular
SULFATOS (mg/kg)	> 500 (0,05 %)	Mala
pH	< 6	Mala
MATERIA ORGÁNICA (ppm/c)	> 50 (0,005 %)	Mala
BACTERIAS OXIDANTES DE SULFUROS		Mala

TABLA 2. Comportamiento del acero galvanizado frente a la corrosividad del suelo.

4.1.2. Materia orgánica total. El método del dicromato potásico empleado da valores materia orgánica total que son mayores que los referidos al carbono orgánico. De todas maneras el alto contenido de materia orgánica puede indicar una importante actividad biológica que define los suelos como no aptos respecto al fenómeno de corrosión.

4.1.3. Sulfatos. La proporción de sulfatos es muy constante y se encuentra en los límites establecidos para suelos considerados como regular-malos. La agresividad directa del ión sulfato frente al acero es inferior a la del ión cloruro aunque hay que tener en cuenta que los suelos con un alto contenido de sulfatos son potencialmente corrosivos por el riesgo de actividad bacteriana, si se dan las condiciones necesarias.

4.1.4. pH. El pH determinado en las aguas de drenaje de los tiestos es sensiblemente mayor que el tomado directamente del contacto con el suelo. De todas formas se observa una clara relación con los efectos corrosivos producidos en las pletinas para cada tipo de suelo.

4.1.5. Resistividad. Se considera actualmente como la propiedad más importante para valorar la agresividad del suelo. De los resultados obtenidos se desprende que los suelos estudiados tienen un carácter fuertemente agresivo frente a los materiales metálicos y fundamentalmente los suelos 1 y 3, lo cual coincide con el efecto corrosivo producido sobre las pletinas ensayadas.

4.2. EVOLUCION DE LA CORROSION DE LAS PLETINAS

El efecto corrosivo de los suelos estudiados en las condiciones establecidas, se valoró por observación visual y microscópica de las pletinas, por su pérdida de peso y por su pérdida de espesor para un período de ensayo total de 1 año y medidas todas estas características a los 2, 9 y 12 meses.

Debido a que las pletinas se hallaban con una gran cantidad de productos de la corrosión adheridos a ellas, se procedió previamente a su eliminación hasta dejar el metal limpio para poder observar el efecto producido (Foto 1).

En todos los resultados obtenidos ha quedado patente el efecto de las condiciones experimentales fijadas respecto a los tratamientos dados a los suelos, indicados en el apartado 3.2.3.

4.2.1. Observación superficial. Una vez limpias las pletinas se observaron visualmente y con lupa binocular anotando los efectos producidos y el tipo de corrosión apreciado, los cuales se resumen y valoran brevemente a continuación.

SUELO 1

Pletina 1: Corrosión irregular tipo fisuras; en otras zonas tipo picadura y en otras sin alterar (+).

Pletina 2: Corrosión más uniforme tipo fisura más profundas (++).

Pletina 3: Corrosión muy uniforme tipo fisura (++).

Pletina 4: Corrosión uniforme tipo fisura profunda (++).

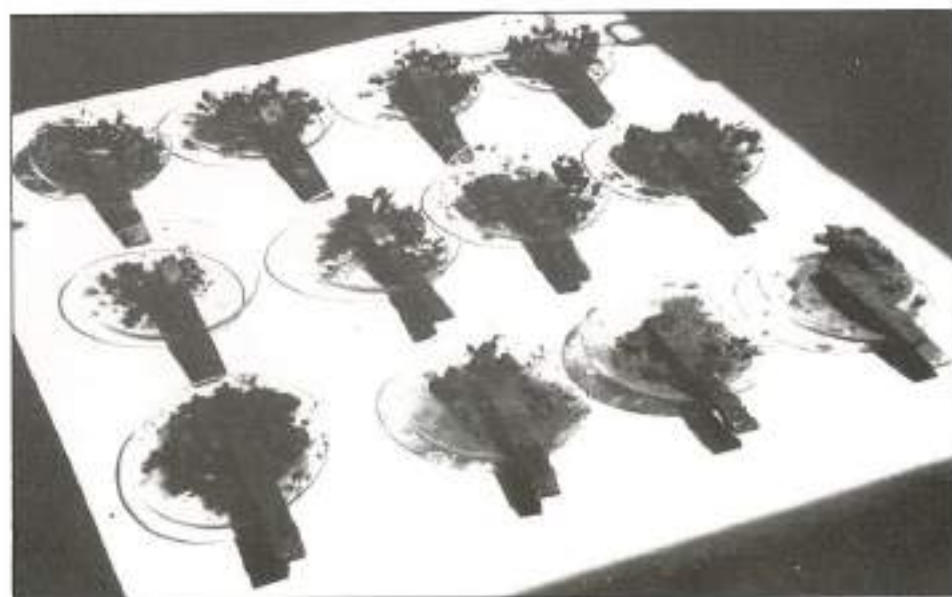


FOTO 1.
Pletinas y
productos
de
corrosión.

SUELO 2

Pletina 5: Poca alteración pero muy localizada; otras zonas sin alterar (+).

Pletina 6: Corrosión irregular tipo fisura y corrosión tipo picadura generalizada (++).

Pletina 7: Muy alterada por corrosión tipo fisuras profundas (+++).

Pletina 8: Alteración muy localizada tipo fisura (++).

SUELO 3

Pletina 9: Alteración generalizada uniforme tipo fisura (++).

Pletina 10: Corrosión generalizada muy importante tipo fisura profundas (+++).

Pletina 11: Igual que la pletina 10 (+++).

Pletina 12: Corrosión generalizada tipo fisura menos importantes que las anteriores (++).

4.2.2. Variación del peso y espesor de las pletinas.

A los 2, 9 y 12 meses de iniciado el ensayo se pesaron las pletinas en precisión y se calculó la pérdida de peso expresándola en tanto por ciento y a partir de éstos se calculó la pérdida de espesor medio expresándola en μm . Los resultados de ambas medidas están recogidos en las Tablas 3 y 4 junto con los valores de resistividad. Con objeto de apreciar el grado de alteración de las pletinas por corrosión al final del período de ensayo, en las figuras 1 y 2 se representan gráficamente las pérdidas de peso y espesor, respectivamente, frente al valor de la resistividad del suelo en que estaban introducidas las pletinas. Como puede observarse, la corrosión ha sido importante y existe una relación significativa con la resistividad del suelo y las condiciones del ensayo. Únicamente, cabía esperar que en el suelo esterilizado por el calor fuera menor el grado de corrosión de las

pletinas en él introducidas (1, 5 y 9); pero si se observan los resultados de los primeros meses sí están de acuerdo con el tratamiento, pero posteriormente debieron sufrir una contaminación importante durante las manipulaciones llevadas a cabo, necesarias para la marcha del ensayo, como se detecta en el análisis bacteriológico realizado al final del período de ensayo y que figura en el apartado 4.3.

4.2.3. Estudio cuantitativo de la evolución de la corrosión.

Para cuantificar la evolución de la corrosión se ha utilizado la pérdida media de espesor por unidad de superficie ($\mu\text{m}/\text{m}^2$) aplicando la fórmula clásica de Romanoff $E = A \cdot T^n$. Se ha adoptado la escala logarítmica en las dos coordenadas para poder representar una recta, lo cual facilita una extrapolación a largo plazo de la corrosión y permite valorar el comportamiento de las pletinas con respecto a la velocidad de corrosión (Darbin, Jailloux y Motuelle, 1986).

$$\log E = \log A + n \log T$$

donde n = pendiente de la recta:

$n < 1$ amortiguamiento de la velocidad de corrosión

$n = 1$ velocidad de corrosión constante

$n > 1$ incremento de la velocidad de corrosión

E = pérdida de espesor en μm

T = tiempo en meses

A = ordenada en el origen (primer mes).

Resueltas las ecuaciones para los valores obtenidos de pérdida de espesor y realizado el ajuste correspondiente por mínimos cuadrados, los resultados calculados para n y A y sus coeficientes de correlación son los que figuran en la Tabla 5. Aunque se hicieron cuatro trata-

SUELO	PLETINA	PESO ORIGINAL g	ΔP (A LOS 2 MESES) %	ΔP (A LOS 9 MESES) %	ΔP (A LOS 12 MESES) %	RESISTIVIDAD $\Omega \text{ cm}$
1	1	22,1609	-1,0	-6,9	-10,0	1770
	2	22,1081	-1,3	-5,9	-8,4	2240
	3	22,0786	-1,2	-6,1	-7,3	2110
	4	22,2074	-1,1	-6,1	-8,0	2330
2	5	18,4132	-0,7	-3,6	-4,4	6510
	6	18,4979	-0,9	-4,2	-5,8	3690
	7	21,9991	-1,9	-7,2	-9,5	3580
	8	21,1028	-1,1	-4,5	-7,8	5900
3	9	21,5648	-1,5	-10,5	-13,4	2270
	10	20,7441	-1,8	-11,0	-16,0	2200
	11	22,3891	-1,8	-11,6	-14,4	1560
	12	23,2702	-2,0	-6,0	-7,9	4190

TABLA 3. Pérdida de peso de las pletinas (ΔP = %).

NOTA: Para las condiciones de ensayo de las pletinas ver Apéndice 3.2.3.

SUELO	PLETINA	SUPERFICIE cm^2	ΔE (A LOS 2 MESES) μm	ΔE (A LOS 9 MESES) μm	ΔE (A LOS 12 MESES) μm	RESISTIVIDAD $\Omega \text{ cm}$
1	1	0,2458	-13	-87	-126	1770
	2	0,2433	-16	-75	-106	2240
	3	0,2458	-15	-77	-92	2110
	4	0,2442	-14	-71	-102	2330
2	5	0,2134	-8	-37	-53	6510
	6	0,2142	-11	-51	-70	3690
	7	0,2533	-24	-88	-115	3580
	8	0,2350	-13	-55	-99	5900
3	9	0,2533	-17	-125	-168	2270
	10	0,2391	-22	-133	-195	2200
	11	0,2583	-22	-146	-195	1560
	12	0,2407	-20	-76	-118	4190

TABLA 4. Pérdida de espesor de las pletinas (ΔE μm).

NOTA: Para las condiciones de ensayo de las pletinas ver Apéndice 3.2.3.

mientos diferentes a cada tipo de suelo donde se enterraron las pletinas, sólo se representan gráficamente los valores medios obtenidos con cada uno, con el fin de seguir más fácilmente la evolución de la corrosión de las pletinas frente a la agresividad de los suelos estudiados (Figura 3).

Como puede observarse la velocidad de corrosión es más bien constante y sin amortiguamiento, debido, probablemente, a que en los períodos de tiempo en que se sacaban las pletinas se limpiaban totalmente de productos de la corrosión, evitando su posible acción protectora y dejando nuevas superficies expuestas al ataque. Como se ha visto ya anteriormente el suelo que ha producido una corrosión mayor es el número 3, aunque potencialmente sea mayor en el suelo número 1.

Respecto a la valoración a largo plazo de la corrosión, ya se sabe que en escala logarítmica prolongar las curvas excesivamente, correspondientes a ensayos hechos en cortos períodos de tiempo, no son muy fiables; por eso la práctica corriente consiste en limitar las extrapolaciones a 9 o 10 años, es decir, unas diez veces la

duración real de los ensayos. En el caso de las muestras ensayadas, para 9 años (98 meses) el valor de la pérdida de espesor de las pletinas por corrosión estaría aproximadamente entre 600 y 1.000 μm , valor que corresponde aproximadamente a una pérdida de peso del 47 al 80 % respectivamente. Estos valores son muy superiores a los encontrados para pletinas extraídas de muros de Tierra Armada de la autopista Vasco-Aragonesa en condiciones reales de servicio durante 7 años, que dan una pérdida media de peso del 10 % para 41 pletinas extraídas. Ahora bien, los suelos donde estaban introducidas no manifestaban todos la misma agresividad respecto a su resistividad y sólo en algunos de ellos se detectó la presencia de bacterias según el informe emitido, pero sin que figuren los valores extremos de las pérdidas de peso ni los suelos a las que pertenecen, factores éstos que hubieran ayudado más a la comparación.

De todo se deduce que el estudio experimental realizado en este trabajo ha sido, por una parte, verdaderamente acelerado en cuanto al efecto agresivo producido por las condiciones de ensayo establecidas: temperatura

SUELO	PLETINA	n	A	COEF. CORRELACION
1	1	1,24	7,7	0,999
	2	1,06	7,5	0,999
	3	1,02	7,7	0,999
	4	1,09	6,7	0,999
2	5	1,04	3,9	0,999
	6	1,03	5,3	0,999
	7	0,88	8,0	0,999
	8	1,08	6,1	0,994
3	9	0,86	19,3	0,999
	10	0,98	9,7	0,999
	11	1,24	9,3	0,999
	12	0,81	14,2	0,990

TABLA 5. Resultados obtenidos para la ecuación de Romanoff.

ra, humedad, aireación y actividad biológica, y por otra, representativo de los problemas que puedan producirse con este tipo de suelos que contienen sulfuros de hierro y que son abundantes en diferentes regiones de nuestro país.

4.3. ESTUDIO MICROBIOLOGICO

4.3.1. Muestras originales. Con las muestras de agua y suelo estudiadas se inocularon, en las condiciones indicadas en el apartado 3.2.1. y 3.2.2., los medios de cultivo Starkey y Leathen obteniendo los resultados indicados en la Tabla 6.

De los resultados obtenidos con ambos medios, tanto líquidos como solidificados, se puede deducir que se trata de bacilos pequeños, Gram negativos, aerobios, estrictamente autótrofos y que obtienen su energía de crecimiento de los compuestos de azufre parcialmente reducidos, por lo que pueden situarse dentro del Género *Thiobacillus*.

Dentro de este género y por las características anteriores, pueden pertenecer a algunas de las especies siguientes: *T. Thioparus*, *Thiooxidans* y *T. Ferrooxidans*. La primera se puede descartar pues esta especie no tolera un pH tan bajo como el producido en las pruebas realizadas. El *T. Thiooxidans* también se puede eliminar ya que aparte de las características de las colonias producidas, estos microorganismos sólo oxidan compuestos de azufre. La especie encontrada corresponde, por tanto, al *T. Ferrooxidans* ya que oxida, también, compuestos ferrosos y forma unas colonias pequeñas, irregulares y blanquecinas como las formadas en los medios sólidos.

Aparte de estos microorganismos se han detectado otros filamentosos e inclusive formas gonoidales en las muestras de agua números 2 y 3 y en las tres muestras de suelos, pero que no se identificaron en un principio en las muestras originales.

4.3.2. Muestras de suelo después del estudio experimental. Con las muestras de suelos procedentes de los 12 tiestos donde se realizaron los procesos acelerados de corrosión después de 12 meses de duración del ensayo, se inocularon, en las condiciones indicadas en el apartado 3.2.1. y 3.2.2., los medios de cultivo Starkey y Leathen, detectando los microorganismos que figuran en las Tablas 7 y 8 de acuerdo con los criterios de diagnóstico indicados más adelante.

Después de las pruebas de laboratorio efectuadas los criterios seguidos para la identificación de los microorganismos detectados han sido los siguientes:

En este estudio cabe considerar principalmente dos grupos de microorganismos: bacterias que oxidan compuestos de azufre y bacterias que oxidan compuestos de hierro, que si bien están relacionadas ecológicamente, muestran características diferentes.

El aspecto de los tipos diferentes de las colonias cre-

MUESTRAS «MEDIO STARKEY»	pH INICIAL	pH FINAL	CRECIMIENTO TURBIDEZ	GRAM		MOVILIDAD
				FORMA	TINCION	
A-1	4,5	2	++	bacilos	I-I	—
A-2	4,5	2	++	bacilos	I-I	—
A-3	4,5	2	+	bacilos	I-I	—
S-1	5,0	3	++	bacilos	I-I	—
S-2	5,0	2	++	bacilos	I-I	—
S-3	5,0	2	++	bacilos	I-I	—
Control	5,0	5	—	—	—	—
«MEDIO LEATHEN»						
A-1	4,5	2	+	bacilos	I-I	—
A-2	4,5	2	+	bacilos	I-I	—
A-3	4,5	2	+	bacilos	I-I	—
S-1	5,0	2	+	bacilos	I-I	—
S-2	4,0	2	+	bacilos	I-I	—
S-3	4,5	3	+	bacilos	I-I	—
Control	4,5	4,5	—	—	—	—

TABLA 6. Muestras originales.

SUELO	MEDIO STARKEY		MEDIO LEATHEN	
	pH	MICROORGANISMOS	pH	MICROORGANISMOS
1-1	5	—	2	T. ferrooxidans Penicillium?
1-2	5	—	2	T. ferrooxidans Bacterias filamentosas
1-3	5	—	2	T. ferrooxidans
1-4	3	T. ferrooxidans Bacterias filamentosas Gonidios	2	T. ferrooxidans Penicillium?
2-5	6	Aspergillus? Gonidios?	2	Bacterias filamentosas
2-6	3	T. ferrooxidans Bacterias filamentosas	2	Bacterias filamentosas
2-7	3	T. ferrooxidans Bacterias filamentosas Gonidios	2	T. ferrooxidans Penicillium
2-8	4	T. ferrooxidans Bacterias filamentosas	2	Bacterias filamentosas Gonidios?
3-9	3	T. ferrooxidans	2	Bacterias filamentosas
3-10	4	T. ferrooxidans Gonidios	2	T. ferrooxidans
3-11	4	T. ferrooxidans	2	T. ferrooxidans Bacterias filamentosas
3-12	3	T. ferrooxidans	2	T. ferrooxidans

TABLA 7. Muestras de suelo después de la experimentación (medio líquido).

cidas en la superficie de los medios sólidos empleados tienen un aspecto característico según el tipo de especie, apreciándose rasgos significativos en cuanto a forma, color, tamaño y consistencia de las colonias. Gracias a estos detalles, la tinción de Gram y las características indicadas en los manuales de clasificación consultados, se ha podido asignar el tipo de colonia con el microorganismo estudiado.

En el grupo de bacterias oxidantes de azufre se pueden distinguir dos subgrupos estructurales totalmente diferentes.

1. El formado por bacterias filamentosas incoloras (*Beggiatoa* y *Thiotrix*).
2. El formado por bacterias unicelulares de forma bacilar (*Thiobacillus*).

Estos microorganismos aparecen en las muestras estudiadas coincidiendo en algunas de ellas.

Los dos tipos de colonias asignadas a este grupo han sido las siguientes:

1. Colonias pequeñas, blanquecinas y refringentes, de contornos lisos aunque el margen algo irregular: *Thiobacillus*.

SUELO	MEDIO STARKEY		MEDIO LEATHEN	
	pH	MICROORGANISMOS	pH	MICROORGANISMOS
1-1	—	—	—	Colonias blanquecinas Colonias ramificadas T. ferrooxidans. Hongos?
1-2	—	—	—	Colonias marrones Colonias blanquecinas T. ferrooxidans B. filamentosas
1-3	—	—	—	Colonias blanquecinas Colonias marrones T. ferrooxidans B. filamentosas
1-4	Colonias pequeñas blanquecinas T. ferrooxidans	—	—	Colonias oscuras Colonias marrones Colonias blanquecinas T. ferrooxidans, Hongos? B. filamentosas
2-5	Colonias gris verdosas, Hongos? B. filamentosas?	—	—	Colonias marrones verdosas B. filamentosas
2-6	Colonias pequeñas blanquecinas T. ferrooxidans	—	—	Colonias verdosas B. filamentosas
2-7	Colonias blanquecinas y colonias verdosas	—	—	Colonias grandes verdosas Colonias blanquecinas Colonias rojizas B. filamentosas T. ferrooxidans, ¿Hongos?
2-8	Colonias blanquecinas T. ferrooxidans	—	—	Colonias blanquecinas T. ferrooxidans B. filamentosas
3-9	Colonias blanquecinas T. ferrooxidans	—	—	Colonias verdosas B. filamentosas
3-10	Colonias blanquecinas T. ferrooxidans	—	—	Colonias blanquecinas T. ferrooxidans
3-11	Colonias pequeñas blanquecinas T. ferrooxidans	—	—	Colonias blanquecinas Colonias marrones T. ferrooxidans B. filamentosas
3-12	Colonias blanquecinas T. ferrooxidans	—	—	Colonias blanquecinas T. ferrooxidans

TABLA 8. Muestras de suelo después de la experimentación (medio sólido).

2. Colonias mayores que las anteriores, verdosas, de contorno dendrítico y extendido debido al tipo de movilidad o de reproducción: bacterias filamentosas.

Después del estudio de las preparaciones realizadas se puede dar la siguiente asignación:

Thiobacillus. Bacilos cortos ($0,5 \times 1,0 \mu m$), Gram (-), con bordes redondeados. De acuerdo con las observaciones descritas anteriormente se puede decir que se trata de *T. ferrooxidans*.

Thiothrix. Bacterias filamentosas, Gram?; cada fila-

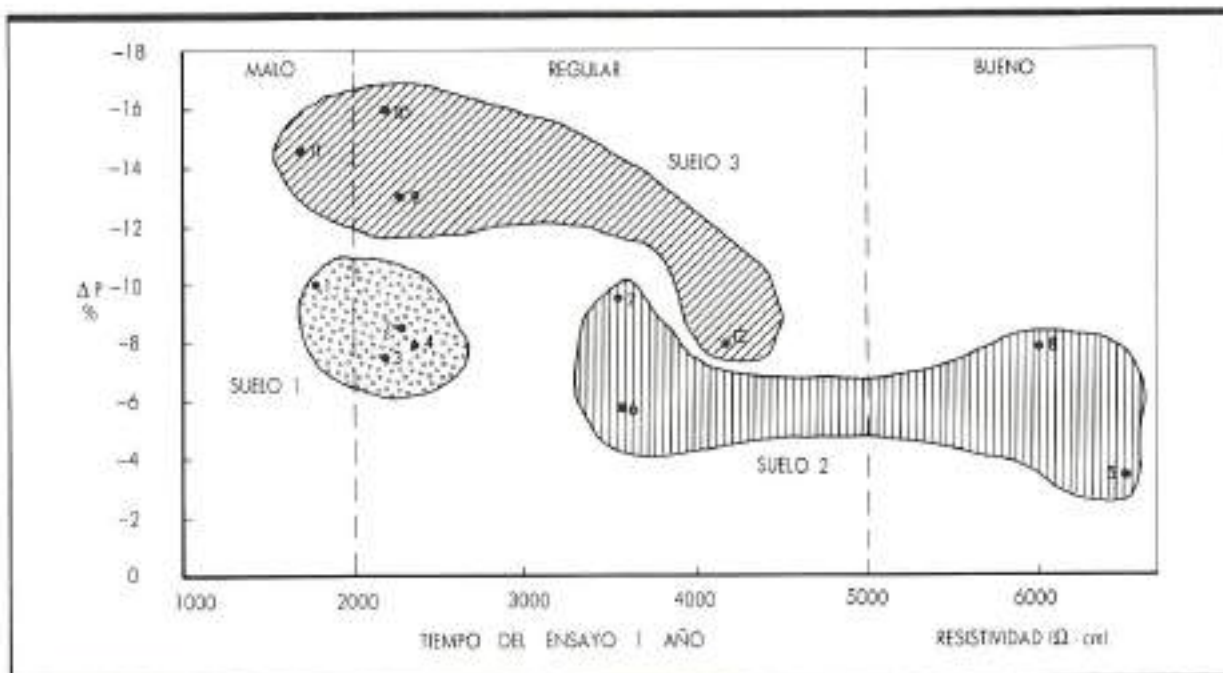


FIGURA 1. Pérdida de peso / Resistividad / Comportamiento / Suelo.

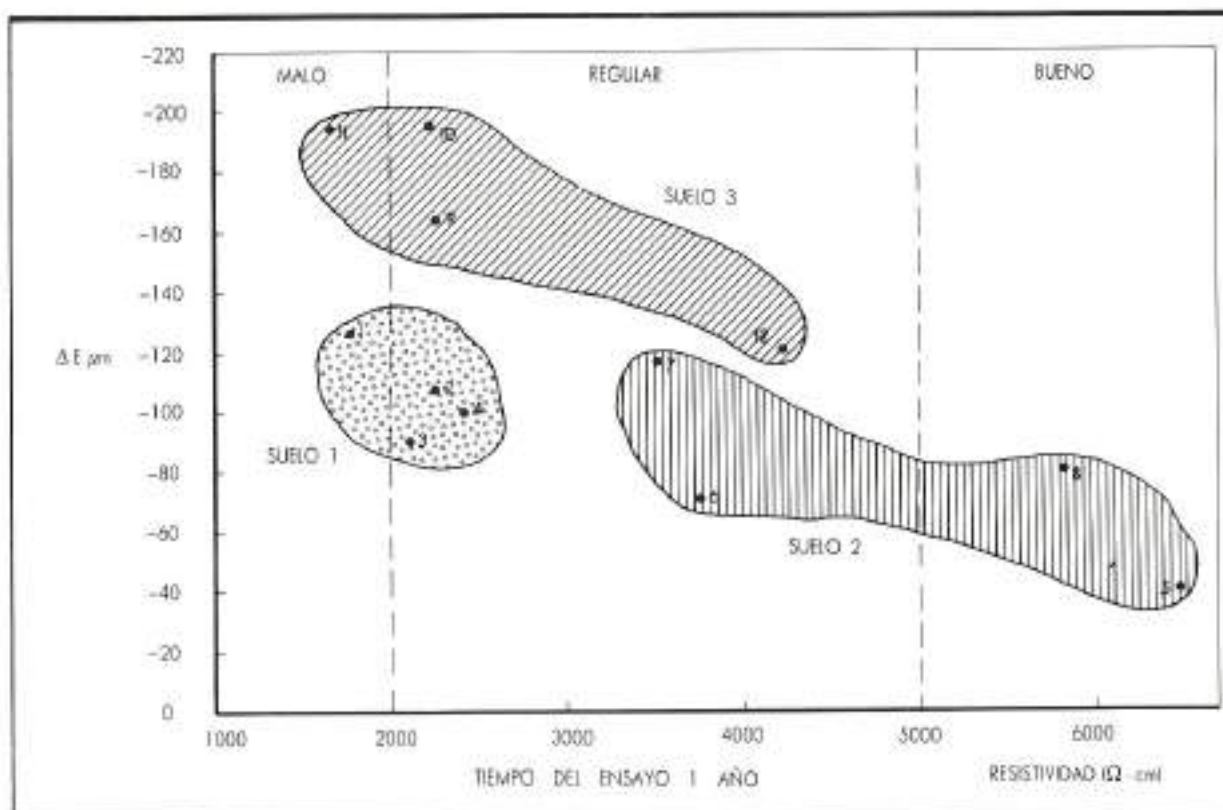


FIGURA 2. Pérdida de espesor / Resistividad / Comportamiento / Suelo.



CENTRALES ELECTRICAS • AGRONOMIA • OBRAS HIDRAULICAS
 • CARRETERAS • PUERTOS Y COSTAS • ARQUITECTURA Y URBANISMO
 GEOLOGIA Y GEOTECNIA • MEDIO AMBIENTE • PLANTAS INDUSTRIALES



inypsa

INFORMES Y PROYECTOS, S.A.
INGENIEROS CONSULTORES

MADRID

General Díaz Porlier, 49
 Teléfono: (91) 402 45 92
 Telex: 42406 inyp E
 28001 MADRID

BARCELONA

Gran Vía de Carlos III, 124
 Teléfono: (93) 205 08 62
 Telex: 97809 inyp E
 08034 BARCELONA

Hormigoneras y Todo-Terreno

LA GRAN MEZCLA!

Nº 1
EN
EUROPA



Autohormigonera **MARINER 50**

OTROS MODELOS DISPONIBLES: MOSQUITO 16 - MOSQUITO 06



GEMINI 20

Para que pudieran andar por cualquier obra sin tropiezos, hemos hecho de las mejores hormigoneras un excelente Todo Terreno.

Con la cabina situada al lado de la boca del tambor para que la rapidez y seguridad de la pala salte a la vista.

Pero lo mejor viene cuando se ponen a andar, con su doble tracción.

Para las **ITALMACHINE** no existen obstáculos. Su tracción a las cuatro ruedas les permite seguir en



GEMINI 28



MARINER 35



BOMBAS DE HORMIGON

lo suyo como si nada, mientras atraviesan los terrenos más accidentados.

Además, donde las demás pasan estrecheces, las **ITALMACHINE** se mueven a sus anchas. Con las cuatro ruedas direccionales son capaces de maniobrar en un palmo de terreno.

Sólo 50 años de experiencia podían dar tanto de sí.

MAS DE 75 PUNTOS DE VENTA EN TODA ESPAÑA
DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

italmachine
it

No es una hormigonera más.
Es una máquina que fabrica el mejor hormigón.
PIDAN DEMOSTRACION SIN COMPROMISO

PIQUERSA

P.O. BOX. 419, Tívoli: (951) 234312 y 241020 - Télex: 70809 PIKES E y 78918
PIKE E - Fax: 252749 - 04080 ALMERIA (Spain)

Centro de distribución para Cataluña: PIQUERSA - Ctra. Igualada, 68 - Tlf:
(93) 8926297 - 08725 VILAFRANCA DEL PENEDÈS (BARCELONA)

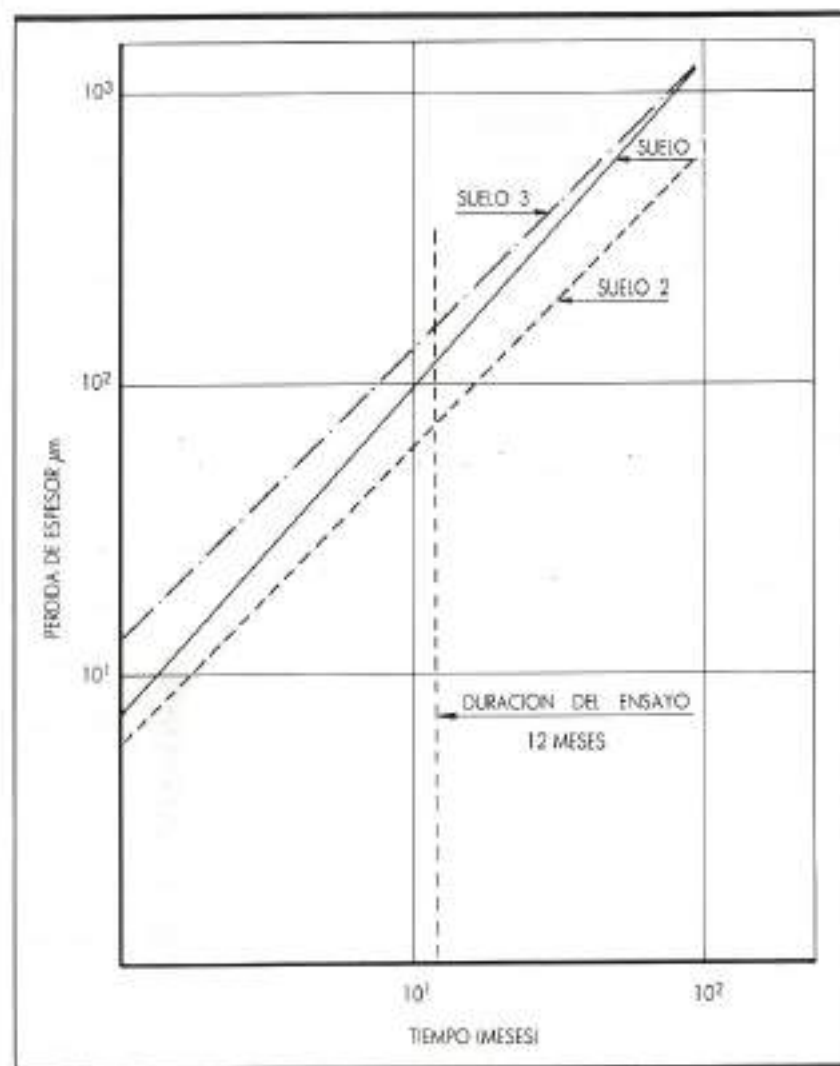


FIGURA 3. Evolución de la corrosión.

mento formado por un gran número de células, segmentación invisible. Se diferencia de *Beggiatoa* en que en algunas preparaciones aparecen gonidios, Gram (-), cerca de vainas vacías, carácter específico de su tipo de reproducción. Por el resto de sus características no ha sido posible asignar una especie determinada. *Thiothrix* sp.

En el grupo de bacterias que oxidan compuestos de hierro se pueden considerar las bacterias envainadas, fundamentalmente *Sphaerotilus* y *Leptothrix*.

El tipo de colonia asignado a estos microorganismos ha sido el siguiente:

1. Colonias de color marrón, relativamente grandes, de bordes irregulares y aspecto suave: bacterias envainadas.

A pesar de no haber empleado el medio de cultivo idóneo para este género de bacterias, la observación de las preparaciones realizadas y los efectos producidos

durante la aplicación experimental, permiten hacer la siguiente asignación:

***Sphaerotilus* y *Leptothrix*.** Se trata de bacterias de estructura filamentososa debida a una matriz orgánica impregnada en óxidos de hierro y manganeso. La morfología varía enormemente con la edad y cultivo. Gram (-).

Con los datos disponibles es difícil hacer una asignación definitiva, aunque por las estructuras observadas pudiera tratarse de *Sphaerotilus* Sp.

Otro tipo de estructuras detectadas, aunque en menor proporción, posiblemente por contaminación, corresponden a unas colonias oscuras y otras rojizas y con cierta ramificación que parecen estructuras miceliales. Dadas las características observadas en las preparaciones realizadas se puede decir que se trata de *Aspergillus* Sp. y *Penicillium* Sp. (Onions, A., 1975), también citadas en los procesos de corrosión de los materiales

metálicos y que han podido contribuir en este caso estudiado a acentuar el fenómeno (Miller, J., 1975).

5. CONCLUSIONES

1. Las pruebas experimentales realizadas en las condiciones establecidas, han podido simular de forma acelerada el efecto corrosivo de los suelos que contienen sulfuros de hierro y son biológicamente activos.

2. Se puede estimar la corrosión a largo plazo de las armaduras metálicas enterradas en estos suelos alcanzando en diez meses el grado de corrosión producido en 7 años en condiciones reales de servicio.

3. En las muestras analizadas se han aislado diferentes microorganismos que se suelen encontrar en aguas y suelos ácidos con un alto porcentaje de sales de hierro y en suelos conteniendo pirita o minerales similares.

4. La actividad biológica desarrollada durante el período de experimentación ha producido también una alteración fisicoquímica de los suelos que ha contribuido en gran parte al fenómeno de corrosión.

5. Los microorganismos aislados han sido, por una parte, *T. Ferrooxidans* y *Thiothrix* Sp., que son bacterias que oxidan compuestos de azufre, y por otra *Sphaerotilus* Sp., que es una bacteria que oxida compuestos de hierro.

6. Puede decirse finalmente, que estos microorganismos pueden permanecer aparentemente inactivos en aguas o suelos cercanos a la neutralidad, desarrollándose posteriormente cuando las condiciones ambientales y nutricionales les son favorables, produciendo la corrosión de las armaduras metálicas empleadas en obras de tierra armada con un material de relleno conteniendo compuestos inorgánicos de azufre y de hierro parcialmente reducidos.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a doña Blanca Díaz y a don Jorge Muñoz del Laboratorio de la Demarcación de Carreteras del Estado en Madrid, por su cola-

boración en la caracterización fisicoquímica de los suelos estudiados.

7. BIBLIOGRAFIA

- BERGEY'S. (1974). Manual of Determination Bacteriology. Eighth Edition, Baltimore.
- BOOTH, G. H. (1961). «1st International Congress of Metallic Corrosion». London.
- DARBIN, M. «Performance and Research on Durability of Reinforced Earth Reinforcement Strips». Proc. ASCE Symp. Earth Reinforcement. Pittsburg (1978).
- DARBIN, M. et JAILLOUX, J. M. (1979). «Experience et recherches concernant la durabilité des armatures de terre armées». Bull. Lab. P. et Ch. N.º 99, París.
- DARBIN, J. (1986). «La perennité des ouvrages en terre armée». Bull. Lab. P. et Ch. N.º 141, París.
- ESCARIO, V.; DAPENA, J. E.; MUÑOZ, J. M., y MARTIN, J. (1976). «Diversos aspectos de los fenómenos de oxidación de las piritas y su influencia en las obras de ingeniería». Simposio Internacional de Rocas Blandas. Madrid.
- FJEDINGSTAD, E. «Sulfur Bacteria». ASTM, STP 650, s/f.
- JAILLOUX, J. M. (1980). «Propriétés physico-chimiques des sols aux ouvrages en terre armées». Lab. Cent. P. et Ch. France.
- MILLER, J. D. A. (1975). «Microbial corrosion of buried and immersed metals». Microbial Aspects of the Deterioration of Materials. Acad. Press, London.
- MONTUELLE, J. (1983). «Application des techniques électrochimiques à la détermination de l'agressivité des sols». Centre National de la Recherche, France.
- MUÑOZ CEBRIAN, J. M. (1981). «Posibilidades de la investigación biológica en problemas planteados en los diferentes campos de la ingeniería y del urbanismo». Bol. Lab. Carreteras y Geotecnia, 145.
- MUÑOZ CEBRIAN, J. M., y RUBIO GUZMAN, B. (1987). «Alteración biológica de rocas conteniendo sulfuros de hierro y su repercusión en obras de ingeniería». Carreteras, N.º 29.
- ONIONS, A. H. S. (1975). «Organisms for Biodeterioration Testing-Moulds and Fungi». Microbial Aspects of the Deterioration of Materials. Acad. Press, London.
- POSTGATE, J. R. «Media for Sulfur Bacteria». Laboratory Practice, vol. 15, N.º 11, University of Sussex.