# ESTUDIO COMPARATIVO DEL POTENCIAL BIOCORROSIVO EN LAS VARILLAS DE REFUERZO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO DE UN COMPLEJO HABITACIONAL EXPUESTO A AGUAS MARINAS CANALIZADAS

*Y. Figueroa de Gil*[1], *G. López de Gómez*[2], *C. Rodríguez*[1], *Y. Bruzual*[1] *y L. Gómez*[3]


- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

*Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 2009; **S1** (3): 1277-1285

# ESTUDIO COMPARATIVO DEL POTENCIAL BIOCORROSIVO EN LAS VARILLAS DE REFUERZO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO DE UN COMPLEJO HABITACIONAL EXPUESTO A AGUAS MARINAS CANALIZADAS

*Y. Figueroa de Gil*[1], *G. López de Gómez*[2], *C. Rodríguez*[1], *Y. Bruzual*[1] *y L. Gómez*[3]

1.- Departamento de Ciencia de los Materiales. Laboratorio de Corrosión. Instituto de Investigación en Biomedicina y Ciencias Aplicadas (IIBCA), Universidad de Oriente. e-mail: yelidegil@gmail.com.
2.- Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Departamento de Mecánica. Núcleo de Anzoátegui. Universidad de Oriente. e-mail: gloryslopez@cantv.net.
3.- Unidad de Cursos Básicos. Núcleo de Anzoátegui. Universidad de Oriente. e-mail: luisilia_1@hotmail.com.

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
*Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento*

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

**Resumen**
En el estudio que se presenta, la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo utilizado en pilotes fundacionales de unidades habitacionales, fue evaluada mediante pruebas electroquímicas de polarización potenciodinámica en medio electrolítico con y sin presencia de bacterias sulfato- reductoras. El propósito principal de la investigación es valorar el efecto que estas bacterias tienen en el proceso de corrosión del refuerzo de acero utilizado en el concreto. El agua de mar utilizada como electrolito fue obtenida de tres sitios seleccionados en canales que limitan con una urbanización moderna, conectada por canales marítimos navegables. Las muestras de acero utilizadas en el estudio provienen de cabillas de refuerzo de uso frecuente en la construcción de las bases de concreto de las unidades habitacionales tipo *palafito,* las cuales están parcialmente sumergidas en las aguas de los canales. Se observó un incremento de la densidad de corriente con una disminución del potencial a valores más reductores en las muestras de agua inoculadas con BSR en comparación con una muestra estéril sin BSR con una velocidad de corrosión de 82,34 $x10^{-3}$.

***Palabras Claves**: Corrosión inducida por BSR, concreto armado, polarización potenciodinámica, MEB.*

**Abstract**
In the present study the aqueous corrosion resistance property of the steel used as reinforcement for concrete piles, was measured by potentiodinamic anodic polarization in a basal solution of sea water with and without SBR. The main purpose of the investigation is to evaluate the incidence of these bacteria in the process of corrosion in the steel. The sea water used as electrolyte was obtained from three selected locations in the marine channels bordering a modern urbanization connected by navigable channels. The steel rods tested correspond to the reinforcement material frequently used in the construction of the concrete submerged bases of *palafito* type residence units, built in the upper mentioned channels. This reflects an increase of the corrosion resistance of the steel submerged in the sterile water and an activation of a more aggressive corrosion process mediated by SBR metabolic activity and subsequent formation of FeS corrosion product in the bacteria inoculated water sample with a value of corrosion velocity of 82,34x$10^{-3}$ mmpy.

***Key words: BSR-**induced corrosion, reinforced concrete, potentiodinamic anodic polarization, MEB .*

## 1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimiento de trozos de concreto, que dejan expuesto el refuerzo de acero al medio, lo que compromete la integridad estructural [3-4]. En las estructuras sumergidas como es el caso de los pilotes de concreto que sirven de base a unidades habitacionales tipo palafito, el problema de deterioro se puede agravar si en el medio existen bacterias capaces de ocasionar corrosión microbiana. Este tipo de corrosión origina o acelera el deterioro y la destrucción de los metales, y es provocada por un gran número de microorganismos - entre ellos las bacterias sulfato reductoras- que están presentes en el suelo o en el agua, donde descomponen activamente la materia orgánica y los minerales, participando de esta manera en los ciclos

naturales del carbono, nitrógeno y azufre, procesos en los cuales se forman diferentes productos que se acumulan en el medio y modifican su composición, ocasionando problemas en aleaciones y materiales no metálicos, y afectando a una gran variedad de industrias, así como también a los materiales de construcción de la infraestructura industrial, causando grandes pérdidas económicas [5]. La corrosión microbiana o biocorrosión, también es un problema serio para las estructuras que están sumergidas en el mar o expuestas a la acción de la atmósfera marina, tales como: pilotes de muelles, grúas de carga y descarga, edificios, etc., ya que el progresivo deterioro de las mismas exige un constante mantenimiento, para poder conservarlas en buen estado [6-7].

En el hormigón armado, que es el material común utilizado en construcciones civiles, la corrosión

evidenciada a través de manchas de oxido, agrietamientos y desprendimiento de material, es otro problema que no sólo afecta la integridad estructural de edificios, dado que causa agrietamientos en el hormigón y reducción de espesor en las armaduras, sino que también compromete la seguridad de las personas que lo habitan y de terceros, provocando la desvalorización del inmueble a causa de su deterioro estético y funcional [3-7].

Es ampliamente reconocido que los microorganismos se fijan o forman películas que influyen en la corrosión de los metales y aleaciones sumergidos en ambientes acuosos naturales. Estos microorganismos influyen en la corrosión cambiando las condiciones electroquímicas de la superficie del metal. Teóricamente estos cambios pueden tener muchos efectos, variando desde la inducción de la corrosión localizada a un cambio en la tasa de la corrosión generalizada o la inhibición de la misma. Sin embargo, el proceso de corrosión sigue siendo electroquímico y las técnicas electroquímicas pueden ser utilizadas en las investigaciones de la corrosión tanto anaeróbica como aeróbica. [8].

En la presente investigación, la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo del concreto utilizado en pilotes fundacionales de unidades habitacionales tipo palafito, fue evaluada mediante pruebas electroquímicas de polarización potenciodinámica en medio electrolítico basal con y sin presencia de bacterias sulfato-reductoras. El propósito principal de la investigación es valorar el efecto que estas bacterias tienen en el proceso de corrosión del acero.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

Una inspección visual con registro fotográfico y estadístico de las fallas observadas en las bases de las viviendas y un análisis físico-químico (pH, sólidos totales, salinidad, contenido de cloruros, sulfatos y hierro) de cinco muestras de aguas tomadas en varias localidades o estaciones en la zona de estudio, permitió la selección de las tres estaciones de muestreo para esta investigación. Para la realización de las pruebas electroquímicas se aislaron bacterias sulfato reductoras (BSR) de las aguas de las estaciones seleccionadas y designadas como I, II y III. Para el aislamiento de BSR se usó un medio de cultivo basal, el cual se preparó de acuerdo al método descrito por Postgate [9]; modificado por Lapage; Shelton y Mitchell, [10]. La preparación para un litro de medio contiene: 0,5 g de KH2PO4; 1 g de NH4Cl; 1 g de Na2SO4; 0,1 g de CaCl22H2; 2 g de MgSO47H2O; 0,5 g de FeSo47H2O; 0,3 g de KCl; 1 g de extracto de levadura; 0,1 g de ácido ascórbico. Como fuente de carbono se utilizó acetato de sodio al 0,2 % p/v., suplementándose con 1 ml de solución de metales trazas y 1 ml de solución vitaminas [11], utilizándose para su preparación 75 % de agua de mar envejecida y filtrada y 25 % de agua destilada. El aislamiento de la BSR a partir de las muestras se realizó siguiendo la técnica de diluciones decimales seriadas (10-1 hasta 10-6). Esta consistió en tomar 1 ml de la muestra del agua para estudio y se le agregó a un tubo de ensayo que contenía los 9 ml del medio de cultivo basal realizando movimientos lentos para mezclar la muestra con el medio, luego, de este tubo se toma un mililitro y se agrega en el siguiente y así sucesivamente hasta completar la dilución. Una vez realizadas las diluciones se incubaron por un periodo de 14 a 21 días a una temperatura entre 27 y 30ºC, el ennegrecimiento de las muestras determinaría la existencia de las BSR.

Para la identificación de las cepas aisladas de bacterias sulfato-reductoras se colocó 1 ml de cada dilución de la muestra en placas de Petri, e inmediatamente se le añadió medio basal con agar (15 ml) fundido y enfriado a ± 45 °C y realizándose movimientos manuales para mezclar la muestra con el medio. Al solidificar el agar las placas se colocaron en recipientes anaeróbicas, jarras anaeróbicas (BBL) con atmósfera de $H_2/C0_2$ y se

incubaron a 30 °C hasta observar la aparición de colonias de color negro (aproximadamente de 10 a 15 días). Al finalizar el período de incubación se aislaron con una aguja de inoculación las colonias características que se desarrollaron, transfiriéndolas en tubos que contenían medio basal semi-sólido y luego se incubaron a 30 °C bajo condiciones de anaerobiosis. Ya obtenidas las cepas aisladas de bacterias sulfato-reductoras se aplicó la técnica de Tinción Negativa, para Microscopía Electrónica de Transmisión (M.E.T.) [12], a fin de observar las características propias de las células bacterianas tales como: forma, tamaño, presencia de esporas y números de flagelos. Para ello se prepararon rejillas utilizando un recipiente con agua destilada, al cual se añadió una gota de colodión al 2%, se secaron a temperatura ambiente y se sometieron a un proceso de evaporación con carbón, en un evaporador de alto vacío, modelo HUS-5GB, marca HITACHI. Una vez preparadas las rejillas estas se colocaron dentro de un tubo de ensayo, el cual contenía una dilución del medio con bacteria sulfato-reductora. Seguidamente se retiró la rejilla y se colocó sobre papel filtro a fin de eliminar el exceso del medio. Posteriormente se colocó una gota de ácido Fosfotungstico al 1 % durante 2 minutos hasta obtener contraste, secándose luego la rejilla sobre un papel de filtro para su posterior observación al Microscopio Electrónico de Trasmisión marca HITACHI modelo S-600 con un voltaje de aceleración de 100 Kv,

Las muestras de acero utilizadas en la investigación fueron extraídas de cabillas utilizadas para el reforzado del concreto u hormigón (almas de acero) empleado en la construcción de los pilotes que sirven de base a unidades habitacionales tipo palafito, construidas en un área turística-residencial en el oriente del país. La composición química del acero en estudio, realizada por espectrometría de masa, se presenta en la tabla 1.

Para los ensayos electroquímicos se utilizaron muestras de 0.8cm2 de área, las cuales fueron preparadas siguiendo el procedimiento para la preparación de muestras metalográficas.

Una vez preparada la superficie a exponer se procedió a conectar un cable conductor, utilizando como material de aporte una aleación 60 % Pb y 40 % Sn, obteniéndose así el electrodo de trabajo.

Para la realización de los ensayos electroquímicos se utilizó un equipo GAMRY Reference 600 acoplado a un computador. Este equipo, requiere del paso de una corriente por el circuito para la medición del potencial de circuito abierto o de equilibrio del electrodo de trabajo, Eeq.

**Tabla 1.** Composición química del acero de las cabillas de refuerzo.

| Elemento | % en Peso |
|---|---|
| C | 0,20 |
| S | 0,015 |
| Si | 0,25 |
| Mn | 0,98 |
| P | 0,012 |
| Cr | 0,016 |
| Ni | 0,020 |
| Cu | 0,013 |
| Al | 0,026 |

Para la medición del Eeq ( Eca Vs t) del electrodo de trabajo se utilizó un electrodo de referencia de calomelano saturado (ESC) inmerso en un capilar de Luggin, el cual contenía una solución saturada de cloruro de potasio (KCl) y la muestra en estudio, ambos electrodos se introdujeron en la celda electroquímica, la cual fue debidamente esterilizada de acuerdo a los procedimientos microbiológicos a fin de mantener los medios completamente estériles. Se realizó un registro por triplicado del valor inicial del potencial del electrodo de trabajo en el tiempo, hasta lograr la estabilización del potencial.

Una vez conocido el potencial de equilibrio de la muestra de acero, se procedió a polarizar la misma desde -300 mV por encima hasta +300 mV por debajo del potencial de equilibrio, con una velocidad de barrido de 2 mV/s. Para el siguiente ensayo, se usó la celda electroquímica anterior pero, con la adición de un contraelectrodo o electrodo auxiliar de grafito. A través de este análisis, se obtuvo el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión, así como las pendientes de Tafel anódica y catódicas, que permitieron calcular las velocidades de corrosión en las estaciones I, II y III seleccionadas para estudio. Estas pruebas de corrosión electroquímicas se realizaron siguiendo la norma ASTM G 5-87 [13]. Hay que señalar que este es uno de los métodos electroquímicos que ha sido aplicado al estudio de la corrosión microbiana en los últimos años, permitiendo conocer la resistencia del acero en estudio a oxidarse durante la aplicación de un potencial externo. Este procedimiento señala que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno de E corr y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión.

La resistencia de polarización (Rp) se calculó a través de la ecuación de Stem-Geary. En este

experimento los datos se obtuvieron en un intervalo de barrido de ± 20 mV alrededor de Ecorr. La velocidad de barrido utilizada en estos ensayos fue de 2mV/s y se corroboró mediante el método de polarización lineal, haciendo uso de la gráfica densidad de corriente versus el potencial correspondiente a la curva anódica-catódica. El tiempo de crecimiento de las BSR en los medios de cultivos utilizados como electrolito fue de aproximadamente 25 días para cada ensayo, con valores promedio de pH de 6,76, temperatura de 27 ºC y potencial redox de -0,89mV.

Una vez realizado los ensayos electroquímicos, se procedió a observar las muestras mediante microscopia electrónica de barrido, a fin de evaluar el daño producido por las bacterias y tratar de establecer una relación entre éste y los resultados obtenidos mediante las curvas de polarización potenciodinámicas, así como los obtenidos de los ensayos fisico-químicos realizados a muestras de agua fresca de las estaciones seleccionadas para estudio.

Se realizaron análisis químico elemental por EDS a todas las muestras sometidas a proceso de corrosión para determinar la composición química elemental y general de los productos de corrosión.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1, se muestra fotografías de deterioros observados en las bases de los palafitos construidos en las cercanías de las aguas objeto de este estudio. Destaca el desprendimiento del concreto, dejando expuesto a las aguas marinas el refuerzo de acero, especialmente en la línea de marea y de salpique.



**Figura 1.** Imágenes fotográficas de deterioros observados en las bases de palafitos construidos en la zona de de estudio.

Las características fisico-químicas de las aguas de las cinco estaciones se indican en la tabla 2.

Las bacterias sulfato reductoras están usualmente asociadas con la corrosión metálica y no con el deterioro del concreto, por lo tanto la selección de las aguas de las estaciones I, II y III para esta investigación se fundamentó en las características fisico-química asociadas con la corrosión del acero (pérdida de hierro hacia el medio) y con una mayor actividad microbiana la cual se relacionó con la acidez del medio (bajos valores de pH) y presencia de contaminantes (sólidos totales), así como con la presencia de nutrientes específicos (sulfatos) presentes en las aguas (Tabla 2).

**Tabla 2**. Características fisico-química de las aguas de las estaciones evaluadas

| Estaciones | Factor de dilución | Interpretación del crecimiento (BSR/ml) |
|---|---|---|
| I | 1:100.000 | 10.00-100.000 |
| II | 1:100.000 | 10.000-100.000 |
| III | 1:1.000.000 | 100.000-1.000.000 |

**Tabla 3**. Crecimiento de colonias de BSR.

| Característica | Estación | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | IV | V |
| T (ºC) | 26 | 26 | 25,4 | 25,4 | 26,5 |
| pH | 7,65 | 7,75 | 8,09 | 8,18 | 7,89 |
| Salinidad (S %) | 36,55 | 35,95 | 30,8 | 34,34 | 35,4 |
| Sulfato (mg/L) | 3220 | 2602 | 2339 | 2602 | 3023 |
| Cloruros (mg/L) | 20,96 | 21,16 | 18,14 | 19,35 | 20,15 |
| Hierro (mg/L) | 0,46 | 0,41 | 0,36 | 0,40 | 0,39 |
| Sól.Totales (mg/L) | 57.552 | 46.816 | 38.244 | 41.904 | 43.052 |

Como resultado del aislamiento de las BSR se pudo comprobar un crecimiento bacteriano planctónico de 100.000 bacterias/ml en las muestras de las estaciones I y III, y de 1.000.000 bacterias/ml en la muestra de la estación II, evidenciado por el ennegrecimiento del agua y sedimento (figura 2), así como por el olor característico a sulfuro de hidrógeno ($H_2S$), el cual se produce generalmente, por la descomposición anaeróbica de compuestos orgánicos que contienen azufre o por la reducción bacteriana del sulfato.

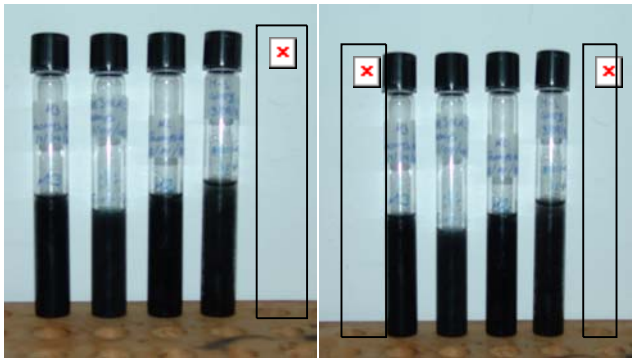


**Figura 2.** Identificación de BSR en las aguas de las estaciones de prueba.

En la tabla 3, se muestra una interpretación de los resultados obtenidos relacionando el factor de dilución con el crecimiento de BSR.
En la figura 3 se comparan los resultados obtenidos en las tres estaciones. Este crecimiento bacteriano ocurrió durante un periodo de 21 días.

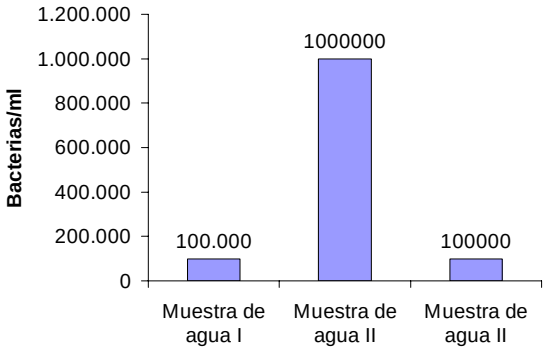



**Figura 3.** Comparación del crecimiento de BSR en las aguas de las estaciones de prueba.

En la figura 4 (a, b y c), se presentan fotomicrografías por contraste de fase de las BSR obtenidas mediante MET.
Se puede observar que estas bacterias presentan características morfológicas bien definidas como son: bacilos rectos o curvos cuyas medidas varían entre 0,40 a 0,63 µm de ancho y de 1,6 a 2,4 µm de largo, móviles por flagelación polar, y células de formas esféricas con tamaño promedio de 0,24 µm de diámetro como las encontradas en la estación III. Estas células pueden encontrarse separadas o en pareja; en su mayoría son gramnegativas, pero pueden presentar tinción grampositivas, son filamentosas y aunque en las muestras encontradas no se observaron esporas, algunas de ellas son formadoras de esporas. Este tipo de bacterias han sido implicadas en la corrosión del acero, cobre y otras aleaciones ferrosas, participando de esta manera en la producción y transformación de depósitos naturales de minerales.
Cabe destacar que a pesar de ser esta una técnica que permite observar la morfología de la célula bacteriana, se hace necesario la aplicación de pruebas bioquímicas diferenciales para determinar género y especie de la bacteria sulfato- reductora encontrada.

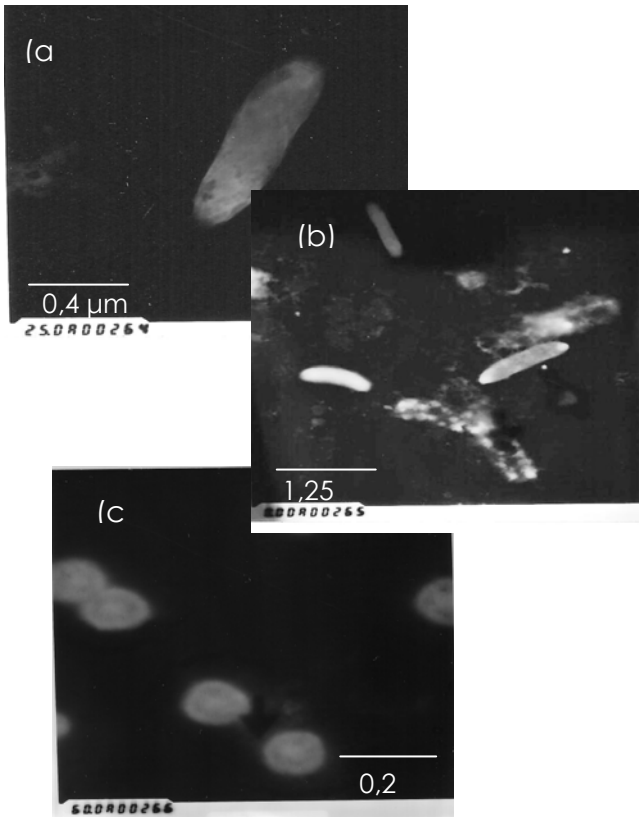



**Figura 4.** Micrografías por contraste de fase de *BSR*. (a) estación I, bacterias con forma de bacilo y flagelo polar, (b) estación II, células de formas ovoides y vibrioides, (c) estación III, formas celulares esféricas.

Los ensayos electroquímicos se iniciaron con la determinación del potencial a circuito abierto, observándose un desplazamiento similar del potencial de equilibrio en -750 mV en las muestras evaluadas de las estaciones I y II con presencia de BSR, alcanzando el equilibrio a los 417 minutos, mientras que para la muestra de la estación III se observa un comportamiento diferente, con una caída rápida de potencial inicial de -620 mV hasta -770 mv, alcanzándose el equilibrio alrededor de los 278 min, a un potencial de -720 mV observándose

fuertes y regulares oscilaciones. Para la muestra evaluada sin BSR se tiene un tiempo de equilibrio mayor (556 min.) como era lo esperado. Figura 5.

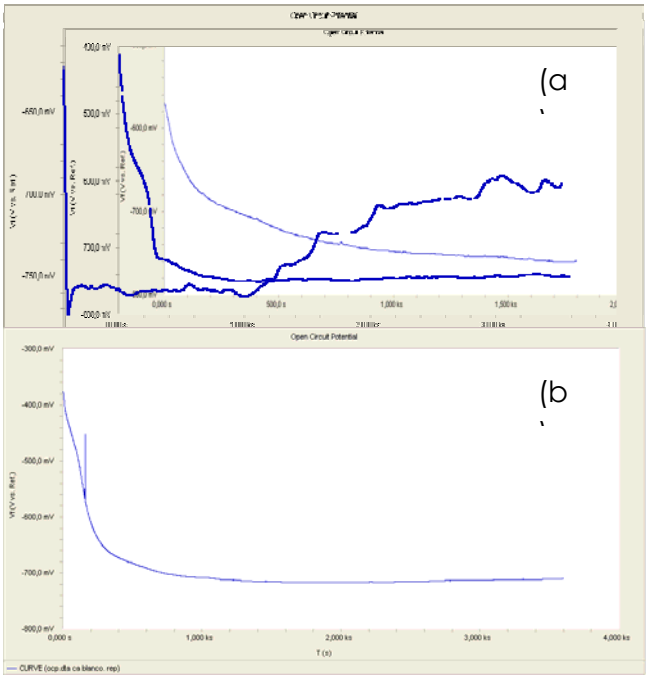



**Figura 5.** Potencial a circuito abierto en muetras del acero de refuerzo, sumergido en: (a) Un medio electrolítico inoculado con BSR. (b) Un medio electrolítico estéril (sin BSR).

De acuerdo con estos resultados, el acero en una solución electrolítica estéril tarda más en alcanzar el potencial de circuito abierto o de equilibrio que en la solución inoculada con BSR. Esto es debido a que el acero en la solución estéril presenta un proceso de oxidación que lo pasiva al formarse en su superficie de una película tenue de óxido, la cual constituye una protección contra el ulterior ataque corrosivo; motivo por el cual tarda más en alcanzar el potencial de equilibrio.

La tendencia de Eca hacia valores más negativos indican una dirección activa del medio y un proceso de un de reducción en la superficie de la muestra, demostrándose con estos resultados que el acero presentó un comportamiento activo. Es de hacer notar, que en estudios sobre la caída inicial del potencial, Hadley [14], ha atribuido este comportamiento a la despolarización catódica del electrodo de acero, o a un aumento del proceso anódico de acuerdo a investigaciones realizadas por Wanklyn [15].

En experimentos similares Horvath [16], atribuyó el potencial de corrosión en estado estacionario, después de una disminución inicial, a la formación de una película semiprotectora de sulfuro de hierro. Esos primeros usos de los potenciales de circuito abierto para estudiar la corrosión inducida por las BSR fueron limitados por la falta de mediciones complementarias. Sin embargo, cambios súbitos (usualmente en la región activa o negativa) en un trazado del potencial versus el tiempo probaron ser útiles para detectar el inicio del ataque acelerado debido a las bacterias.

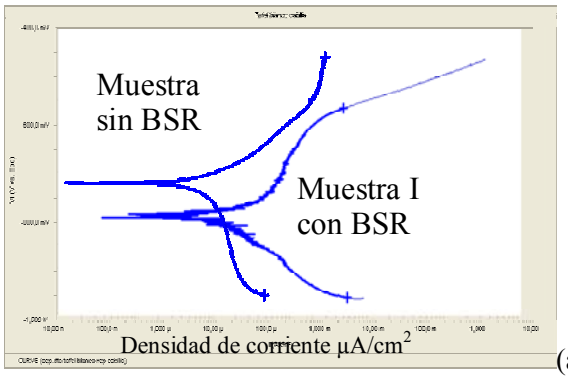
La figura 6 (a, b y c) muestra las curvas anódicas y catódicas obtenidas de los ensayos electroquímicos aplicados con agua de las estaciones I, II y III.

Como puede apreciarse, el comportamiento del refuerzo de acero en ensayado en medio electrolítico inoculado con bacterias sulfato reductoras es similar en las tres estaciones, observándose un aumento del Ecorr de -828 mV en la dirección catódica en la estación II donde se encontró el mayor número de bacterias planctónicas en el medio de 1.000.000 ufc/ml.

La reacción de reducción que acompaña el proceso anódico tiene gran importancia en la corrosión microbiológica ya que la generación de $H_2S$ se produce muchas veces por la actividad metabólica de las bacterias sulfato reductoras, las cuales reducen el sulfato presente en el medio donde crecen, generando mezclas de $HS/H_2S$. Esta reacción permite explicar la corrosión del hierro y aceros en ausencia de oxígeno y en medios neutros, donde la concentración de $H^+$ es muy baja. En estas condiciones, la reacción catódica que acompaña a la disolución del hierro es la reacción del $H_2S$ para dar $H_2$ [17].

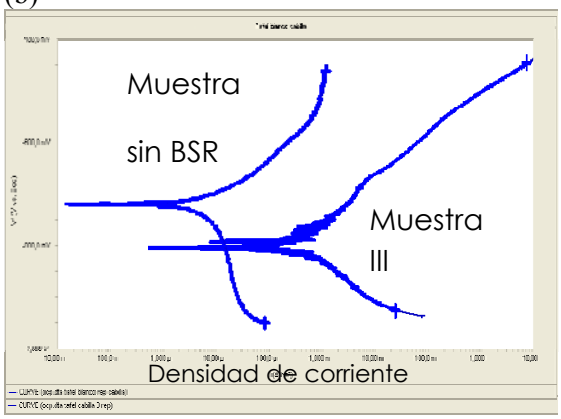
De acuerdo a los valores obtenidos de las curvas de resistencia de polarización las muestras que están en el medio de control estéril presentan mayor resistencia de polarización, es decir oponen mayor resistencia al proceso de oxidación, que las muestras que se encuentran en un medio inoculado con BSR.

Adicional a los resultados ya discutidos, se encontró que la velocidad de corrosión para las muestras en un medio inoculado con BSR es mayor que la obtenida en ausencia de BSR., esto se puede verificar en la tabla 4, donde se indican los resultados de las pruebas electroquímicas.




(a)

(b)




( c)

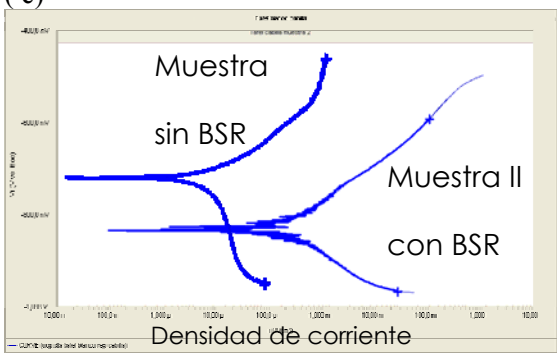



**Figura.6.** Curvas de polarización potenciodinámica con velocidad de barrido 2mV/seg desde la región catódica hacia la región anódica en un medio sin BSR y en electrolítico de agua de las estacione inoculado con BSR (a) estación I, (b) estación II y (c) estación III.

De la tabla 4, destaca que la mayor velocidad de corrosión ($82{,}34x10^{-3}$ mm/año) se obtiene al emplear como electrolito el agua proveniente de la estación II inoculada con BSR, relacionándose esta velocidad con el mayor número de bacterias planctónicas (1.000.000 ufc/ml) determinadas en el análisis de las tres estaciones.

**Tabla 4.** Parámetros electroquímicos obtenidos usando el método de extrapolación de Tafel y la ecuación Stem-Geary en las tres muestras de agua con BSR y en agua estéril.

| Característica | Estaciones | | | |
|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | Agua Estéril |
| $I_{corr}$ ($\mu A \times cm^{-2}$) | 2,23 | 5,36 | 1,56 | $1{,}27x10^{-6}$ |
| $E_{corr}$ (mV) | -797 | -828 | -801 | -718 |
| $V_{corr}$ (mm/año) | $25{,}97x10^{-3}$ | $82{,}34x10^{-3}$ | $18{,}12x10^{-3}$ | $14{,}77x10^{-3}$ |
| Rp ($\Omega$-cm2) | 2,108 | 2,244 | 2,739 | 5,646 |
| $\beta a$ (mV/Dc) | 191,8 | 38,8 | 98,7 | 39,2 |
| $\beta c$ (mV/Dc) | -143,1 | -301,6 | -68,6 | -105,4 |

La morfología de las superficies de las muestras que resultaron con los mayores valores de velocidad de corrosión, se presentan en la figura 7.

Los aspectos morfológico más representativos de las superficies evaluadas (MEB y EDS) se reportan en las figuras 7 (a, b y c) y 7 (d, e y f) para las muestras expuestas a los medios preparados con las aguas de las estaciones I y II, respectivamente.

En las figuras 7a y 7d, se muestra de manera comparativa y a bajo aumento, el aspecto general de las dos superficies luego de finalizados los ensayos electroquímicos. Puede observarse que en la muestra expuesta al medio de la estación I, presenta gran cantidad de sales, picaduras y zonas protegidas con una película de aspecto homogéneo (Figura 7 a). En el caso de la muestra expuesta al medio de la estación II, se observaron pocos puntos cubiertos por sales, una superficie más abrupta y rugosa, donde también destacan picaduras de diámetro muy pequeño (Figura 7 d).

El análisis realizado en los puntos indicados en ambas superficies reveló la presencia simultánea de de los elementos Na, Ca, Si, Al, S y Cl, en puntos cuya morfología hizo suponer la presencia de sales. En éstos puntos, las mayores concentraciones se reportaron para los elementos Na, Al, S y Si; lo cual sugiere la formación de sales complejas ricas en sodio, las cuales posibilitan reacciones electroquímicas intensas.

En cuanto a la morfología de películas protectoras, destaca que aún cuando no se puede observar una película homogénea de productos de corrosión, las pocas zonas cubiertas permiten establecer algunas diferencias cuando son observadas a mayores aumentos mediante MEB. En las fotomicrografías 7b y 7e, es evidente que las películas formadas por los dos diferentes medios presentan morfología distinta. La película formada en la estación II es mas gruesa, rugosa, menos compacta y menos adherente que la obtenida en la estación I. Tales características, claramente diferenciables en las fotomicrografías 7c y 7f, sugieren gran actividad química para la formación de las películas gruesas, pero poca protección por la falta de adhesión de las mismas al substrato de acero, y como consecuencia de esto, disminuiría la resistencia a la corrosión en la estación II, tal y como se comprobó a partir de las velocidades de corrosión obtenidas en ambas estaciones.

El valor relativamente alto de la velocidad de corrosión obtenida en la estación II (217% mayor que en la estación I), donde se reportó el mayor crecimiento de BSR, puede muy bien ser correlacionado con la pobre protección que la película de producto de corrosión brinda a la superficie. Por lo tanto, se puede ratificar que bajo las condiciones experimentales establecidas en este estudio, los resultados obtenidos indican, que el ataque por corrosión inducida por microorganismos (CIM), es esencialmente un proceso anódico, donde las BSR interfieren con la formación de una película pasiva.

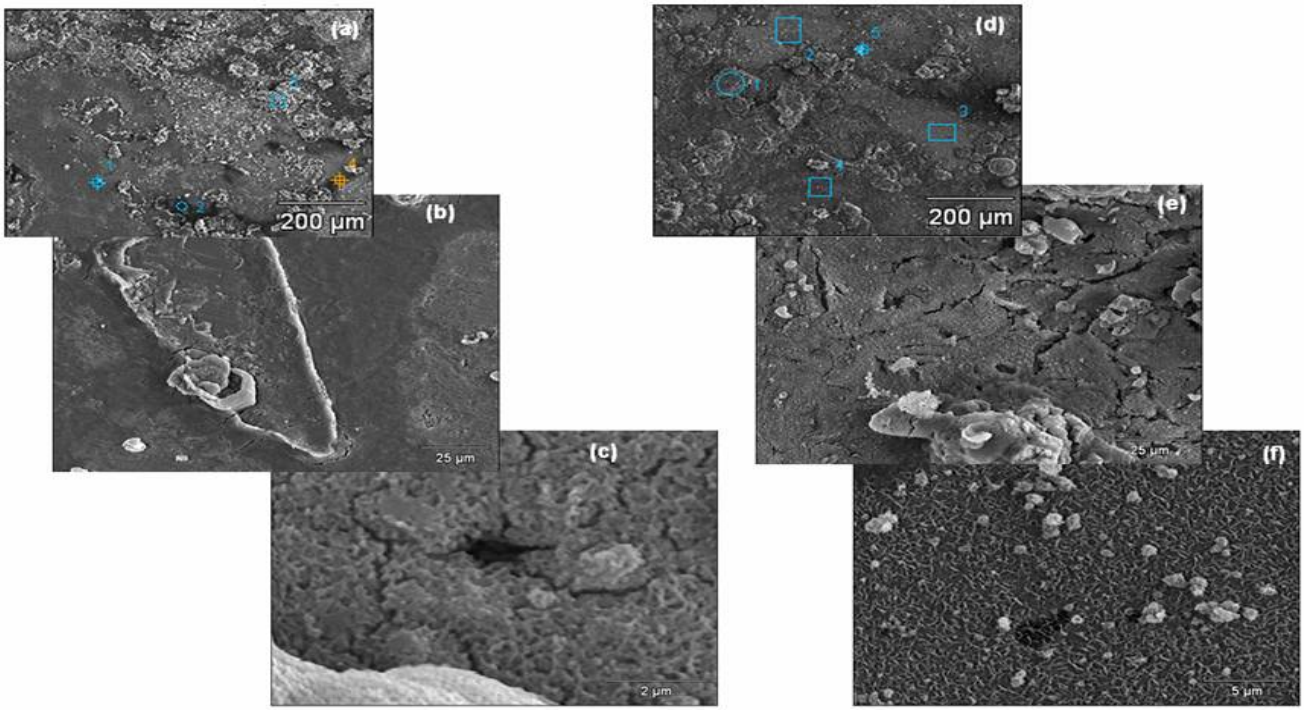



**Figura 7.** Morfología superficial correspondiente a las muestras que presentaron mayor velocidad de corrosión.
(a), (b), (c ): Aspecto superficial de las muestras expuestas al medio preparado con aguas de la estación I y BSR.(d), (e), (f): Aspecto superficial de las muestras expuestas al medio preparado con aguas de la estación II y BSR.

## 4.- CONCLUSIONES

- Se constató la presencia de bacterias sulfato reductoras en las estaciones estudiadas, presentando éstas morfologías bien definidas en forma de bacilos, rectos y curvos y esferoidales con presencia de flagelos.
- Las cabillas de acero utilizadas como refuerzo en los pilotes que sirven de base a unidades habitacionales tipo palafito, tardan más en alcanzar el potencial a circuito abierto o de equilibrio en una solución electrolítica estéril que en solución de agua de mar inoculada con BSR. Esto se asocia a la formación de una película tenue de óxido, la cual inhibe la corrosión del acero en la solución estéril.
- El acero utilizado como refuerzo en los pilotes, experimentó una mayor velocidad de corrosión en un medio inoculado con BSR. Estos

resultados señalan que el ataque por CIM está controlado esencialmente por las reacciones anódicas, atribuyendo la interrupción de la película pasiva a la presencia de las BSR.

## 5.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] Daly, K., R.J Sharp, and A.J McCarthy. 200. Development of oligonucleotide probes and PCR primers for detecting Phylogenic subgroups of sulfate –producing bacteria. Microbiology 146: 1693-1705.

[2] Hines, M. E., P.T Visscher, and R. Deverux. 2002. Sulfur cycling, p427-438. In C. J. McInemey, and D.L.D. Stetzenbach, Manual of environmental microbiology, 2nd ed. ASM Press, Washington, D.C.

[3] M.D. Ferrari, M.F.L. de Mele y H.A. Videla. Corrosión impacto ambiental sobre materiales. Red temática XV. C Red iberoamericana de corrosión microbiológica y biofouling en sistema industriales (BIOCORR).1995.

[4] Vico, W. Morris, y M. Velásquez. Evaluación el avance de la corrosión de refuerzo en estructuras de hormigón. Universidad Nacional Mar del Plata. 2003.

[5] Steven F. Daily. Using protection to control of corrosion of reinforced concrete structures in marine environments. Corrpro Companies. Inc.

[6] CYTED. Red DURAR (Durabilidad de la armadura),Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, ISBN 980-296-541-3, 1997.

[7] M. A. Frontini Corrosión Microbiológica. Asociación Argentina de Materiales Registro N°ISSN 1668-4788.

[8] L. Shreir. Corrosion Metal and Environment. Second Edition, Editorial Hazell Watson and Viney. LTD . London, 1975.

[9] J. Postgate. Versatile Medium for the Enumeration of Sulfate-Reducing. Appl. Microbiol., 11. 265-267. 1963.

[10] S. Lapage; J. Shelton y T Mitchell. Media for the Maintenance and Preservation of Bacteria. En: Methods in Microbiology. Norris J. Ribbons, D. (eds.), Academic Press, London, New York. 10. 120. 1970.

[11] A. Brehneshstuhl, T. Gendron and R. Cleaned. Mechanism of Underdeposit Corrosion on Freshwater Cooled Austenitic Alloy Heat Exchangers. Corrosion Science . 35 : 699-711, 1993.

[12] Mercer y M. Birbeck. Manual de Microscopía Electrónica para Biólogos, Editorial Blumé. Madrid. 58-59 . 1972.

[13] ASTM Designation: G 5– 87. Making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurenments.

[14] Florian Mansfeld y Brenda Little. Technical Review of Electrochemical Techniques applied to Microbiologically Influenced Corrosion. Corrosion Science. 32. Nº 3. pp 247-272. 1991.

[15] I. Fonseca, J. Feio, A. Lino, M. Reis, y V. Rainha. The influence of the media on the corrosion of mild steel by Desulfovibrio desulfuricans bacteria: an electrochemical study. Acta Electrochimica, 43 (1-2): 213-222. 1998.

[16] Horvath. Acta Cimica Hungarian. 25. pp 65-78. 1960.

[17] R. C. Salvarezza, and H. A. Videla, Microbiological corrosion in fuel storage tanks. Part I. Anodic behavior. Acta Científica Venezolana 35:244-247, 1998.