

EVALUACIÓN DE PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN REACTORES ANAEROBIOS PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

D. LAVERDE., C. RETAMOSO., C. VÁSQUEZ., M.T. SUÁREZ., L. S. QUINTERO

Grupo de Investigaciones en Corrosión, Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
email : icorros@uis.edu.co

RESUMEN

En esta investigación se analizaron los problemas de corrosión presentados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Río Frío, perteneciente a la Corporación Autónoma Regional, que es la encargada de tratar las aguas residuales de la zona sur de Bucaramanga, Colombia.

Se realizó una inspección preliminar a la PTAR, para definir zonas a muestrear y avance de la corrosión en la estructura de los reactores UASB. Se hicieron pruebas de carbonatación, concentración de cloruros y sulfatos en dos de los tres reactores UASB existentes en la planta, en su interior y en la parte superior correspondiente a la zona de sedimentadores. Además se hizo la predicción del tiempo en el que la carbonatación y los iones cloruro alcanzarán la armadura de los reactores, y con el perfil de concentración medido en cada testigo se calcularon los coeficientes de difusión de los iones cloruro y sulfato a través de la estructura.

A nivel de laboratorio se realizaron pruebas de celdas de difusión y celdas de inyección; en la primera se utilizaron morteros de cemento tipo V y soluciones simuladas de concreto con iones Cl^- y SO_4^{2-} . En las celdas de inyección se utilizaron varillas de acero tipo A-37 y PDR-60 y se realizaron ensayos de resistencia a la polarización (R_p) diariamente.

El problema que se ha trabajado en este caso ha sido poco tratado en la literatura y el desarrollo de la metodología para abordarlo es una contribución importante a la ingeniería de la corrosión.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bucaramanga, República de Colombia, se ha caracterizado en los últimos años por un gran aumento en el número de sus habitantes, acompañado de un moderado crecimiento industrial. Estos dos hechos han traído como consecuencia un mayor aporte de desechos orgánicos e inorgánicos a los recursos hídricos de la ciudad contaminándolos y degradándolos. Como respuesta positiva para combatir el deterioro del ambiente, se ha creado una legislación ambiental, cuyo fin principal es la

conservación del medio y el manejo responsable de los recursos naturales. La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, consciente de esta problemática, ha tenido una participación activa con la creación entre otros del Plan Integral de Saneamiento Ambiental de Bucaramanga PISAB, el cual ha contemplado programas de ampliación de la red de alcantarillado y la implementación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR como soluciones

trascendentales para alcanzar un mejor nivel de vida.

El Grupo de Investigaciones en Corrosión, GIC de la Universidad Industrial de Santander, UIS hace su contribución a la solución del problema tratado en este artículo por medio de la presente investigación, la cual buscó medir el grado de corrosión alcanzado en las estructuras de los reactores UASB de la PTAR de Río Frío, al igual que la definición de factores y métodos para ofrecer un servicio de diagnóstico y control de la corrosión en sistemas de características semejantes.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La P.T.A.R. de Río Frío, presenta problemas de corrosión en sus instalaciones debido a la presencia de las bacterias sulfato reductoras en el interior de los reactores UASB, necesarias para la degradación de la materia orgánica; estas producen a su vez, H_2S , el cual, en contacto con el ambiente, se convierte en ácido sulfúrico, un poderoso agente corrosivo; además en el manto de lodos de los reactores se produce CO_2 , el cual ocasiona la carbonatación del hormigón⁶. La presencia en las aguas de iones agresivos como el Cl^- , el cual al llegar a la armadura en ciertas concentraciones produce su despasivación, y el ion SO_4^{2-} que reacciona con los componentes de la pasta, crean compuestos altamente higroscópicos que causan una acción expansiva en el interior del concreto, ocasionando fisuras y deslaminación.

FUNDAMENTOS GENERALES DE CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO

El hormigón confiere al acero una protección de doble naturaleza: por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del hormigón es un electrolito que puede formar un óxido protector (pasivación) de forma duradera. Esta solución acuosa está constituida principalmente por iones OH^- , a los que se debe la alta alcalinidad. Inicialmente se pensó que el

hidróxido de calcio ($pH \approx 12.5$) producido durante las reacciones de curado era el componente principal que originaba esta alta alcalinidad; sin embargo, se ha demostrado que el pH de la solución en los poros es de 13 a 14, lo cual es debido a los hidróxidos de sodio y potasio, ya que el ion calcio prácticamente desaparece de la disolución cuando el cemento progresa en su hidratación. La cantidad relativa de cada uno de esos iones depende fundamentalmente de la composición y características del cemento, del grado de hidratación y de la relación agua / cemento (a/c)^{3,4,5}.

Corrosión de la armadura en el hormigón

La corrosión de la armadura en el hormigón consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que lo rodea. Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales: un ánodo, donde ocurre la oxidación; un cátodo donde ocurre la reducción; un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones; y un electrolito, en este caso el hormigón, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso^{8,9}.

La corrosión electroquímica del acero en el hormigón resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, así como también, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (hormigón) que rodea al acero⁵.

Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse es necesaria la reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido o la acción electroquímica que involucra al ion cloruro ó sulfato en presencia de oxígeno.

Es importante resaltar que sin la presencia simultánea en el hormigón de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y, sin una cantidad mínima crítica de ambos, no es posible que se desarrolle con gran velocidad.

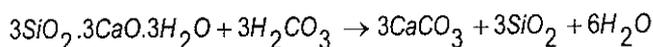
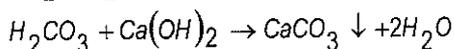
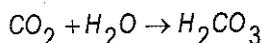
Mecanismos de corrosión del acero de refuerzo en el concreto

El cemento al reaccionar con el agua genera, además de los compuestos hidratados responsables de sus propiedades mecánicas, el hidróxido de calcio o Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, material soluble en agua que rellena los poros y capilares del concreto y le confiere a la masa del concreto alta alcalinidad, pH entre 11,5 y 12,5. Este hidróxido ofrece pasividad al acero del refuerzo al recubrirlo, en ausencia de iones agresivos, de una película protectora de Fe_2O_3 , que se forma en los primeros instantes de la hidratación, y cuyo espesor es del orden de 10^{-3} a $10^{-1} \mu\text{m}^{3,4}$.

• Carbonatación

El proceso de carbonatación consiste en la reacción de los constituyentes ácidos del medio con la fase líquida intersticial saturada en hidróxido cálcico del hormigón. Los compuestos hidratados del cemento en equilibrio reaccionan con dicha fase líquida. En la atmósfera los responsables de este fenómeno son el SO_2 y el $\text{CO}_2^{3,4}$.

Para la carbonatación del cemento Portland se ha propuesto el siguiente sistema de reacciones:



El frente carbonatado avanza en todo el concreto con un pH de 8. El acero se corroe a un pH < 11. Cuando la carbonatación llega al refuerzo, la capa pasiva se rompe y la corrosión se inicia.

Velocidad de Carbonatación

El progreso del frente carbonatado se calcula aproximadamente por la ley de difusión de Fick

$$X_{\text{CO}_2} = K_{\text{CO}_2} \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde,

X_{CO_2} : Profundidad del frente carbonatado, mm

K_{CO_2} : Constante de carbonatación, $\text{mm} \cdot \text{año}^{-0.5}$

t: Tiempo, años.

• Cloruros

Existen varias tesis sobre la estructura de la capa pasiva y el mecanismo de rompimiento de la misma por iones cloruro. Una teoría establece que los iones cloruro presentes en el concreto viajan hacia la película de óxido, formada sobre la superficie del refuerzo, y reemplazan al oxígeno e incrementan la conductividad de la película y la solubilidad del agua en ella y en relación a esto destruye su carácter protector. Otro mecanismo alternativo considera que el cloruro se combina con los iones ferrosos y previene la formación de la película pasiva^{3,4}.

Se han propuesto tres teorías para explicar la corrosión causada por ataque de cloruros:

Teoría de la adsorción

Considera que los cloruros se adsorben sobre el metal y compiten con el oxígeno disuelto y los iones OH^- presentes.

Teoría de la película de óxido

Sugiere que los iones cloruro penetran la capa pasiva a través de los defectos y poros de la película inicial.

Teoría del complejo

Considera que los iones cloruro compiten con los iones OH^- , por los iones ferrosos y generan complejos que al difundirse lejos del ánodo destruyen la capa protectora y permiten que progrese la corrosión.

Velocidad de corrosión por cloruros

Al igual que el caso del CO_2 , el avance de los cloruros es una función de la raíz cuadrada del tiempo^{3,4}:

$$X_{\text{Cl}^-} = K_{\text{Cl}^-} \times \sqrt{t} \quad (2)$$

Donde:

X_{Cl} : Profundidad alcanzada por una cierta proporción de Cloruros.

T: Tiempo

K_{Cl} : Constante dependiente del hormigón y del medio

Una de las expresiones matemáticas que más se emplea para efectuar la predicción de la velocidad de penetración, o para ser ajustada a los perfiles de concentración de cloruros encontrados en las estructuras reales, es la solución de la segunda ley de Fick³:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

que se conoce como la "ecuación de la función de error":

$$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{X_{Cl}}{2\sqrt{D_{ap}} \times t} \right) \quad (4)$$

Donde:

C_x : Concentración a la distancia x.

C_s : Concentración superficial.

X_{Cl} : Profundidad alcanzada.

D_{ap} : Coeficiente aparente de difusión.

t: Tiempo.

• Sulfatos

El ataque por sulfatos afecta tanto la matriz de concreto como el acero de refuerzo en sí^{3,4}.

Efecto sobre el acero de refuerzo

El efecto del ion sulfato es diferente del efecto del ion cloruro. En el caso del ion sulfato, la secuencia de la reacción no cambia de transferencia de carga a control difusional, debido a que es posible que la película de óxido-hidróxido existente sea remplazada por una película menos protectora. La modificación de la película protectora original por el ion sulfato posibilita la formación de una película de sulfato el cual es menos protectora que la de óxido de hierro original. Esto hace que la corrosividad del ion sulfato sea menor que la de los iones cloruro.

Los sulfatos están presentes en muchos compuestos como el yeso CaSO_4 , el cual tiene un límite de solubilidad que lo hace estable y no genera problemas. Otros compuestos que contienen sulfato de magnesio, álcalis – sulfato o sulfato de amonio, o ácido sulfúrico pueden causar deterioro en el concreto debido a que pueden descomponerse en materia orgánica, generando una reacción de expansión entre los sulfatos y la fase aluminato – calcio, causando grietas y permitiendo un mayor ingreso de agua conteniendo iones agresivos incluyendo sulfatos los cuales aceleran la reacción y continúan el deterioro.

• Reacción álcali-agregado

Otra causa de destrucción del concreto es la reacción que puede ocurrir entre los álcalis presentes en el concreto y ciertos agregados reactivos, particularmente los que contienen Sílica amorfa o Sílica hidratada. El Na_2O y el K_2O están presentes en el Clinker en cantidades dependiendo de la fuente de material bruto. En la pasta de cemento estos forman hidróxidos e incrementan el pH a niveles de 12,5 a 13,5. En tales soluciones fuertemente alcalinas, la Sílica reacciona para formar sílica gel, la cual es higroscópica, absorbiendo grandes cantidades de agua, causando hinchazón que aplica una presión alrededor de la pasta de cemento y ocasiona la fisuración del concreto. Si el concreto es muy húmedo, la gel puede fluir relativamente y exudar de la superficie de la estructura, dando la apariencia de unas gotas gelatinosas, pero no causa ningún daño estructural⁵.

METODOLOGÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

• Inspección preliminar

Después de realizar algunas visitas a la P.T.A.R de Río Frio se decidió iniciar el trabajo de acuerdo con el plan que se muestra en la Figura 1. En estas visitas a las instalaciones se observó el grado de deterioro de cada una de sus partes, se determinaron las zonas a muestrear en los reactores UASB ("UPFLOW

ANAEROBIC SLUDGE BLANKET"), y se recolectó información acerca de los antecedentes (histórico) de las estructuras de los reactores y sus especificaciones de diseño.

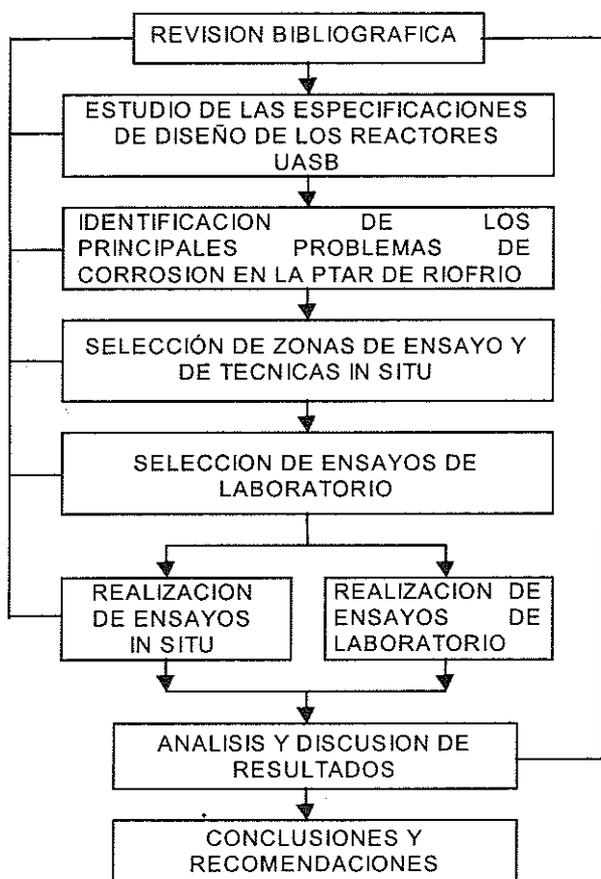


FIGURA 1. Diagrama de Bloques representativo del plan de trabajo de la investigación.

- **Identificación del objeto de la investigación. Especificaciones de diseño**

En la Figura 2, se presenta el diagrama de bloques de la instalación.

En la Tabla 1 se presentan las especificaciones principales de diseño del sistema de tratamiento.

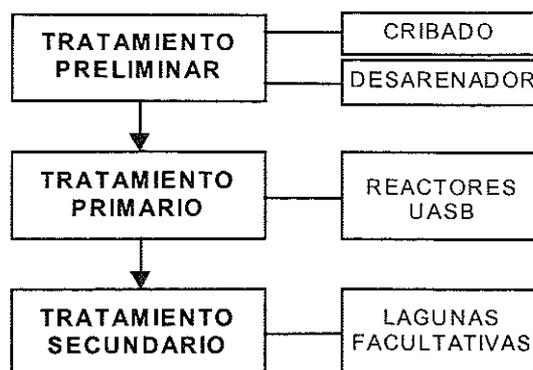


FIGURA 2. Diagrama de bloques de la instalación P.T.AR Río Frío

TABLA 1. Especificaciones de diseño de los reactores¹⁰.

PARÁMETRO	VALOR
Caudal del reactor UASB No. 1	180 litros / segundo
Caudal del reactor UASB No. 2	150 litros / segundo
Caudal del reactor UASB No. 3	150 litros / segundo
Tiempo de retención hidráulica en reactores UASB	5 horas (en cada reactor UASB)
Producción de gas	800 a 1000 m ³ /día en cada reactor
Altura del manto de lodos en el reactor	2,00 metros
Profundidad del reactor	4,20 metros

- **Selección de análisis y zonas de ensayo in situ**

En la Tabla 2, se presentan las zonas y, dentro de estas, los sitios que lucieron más interesantes para analizar. En la figura 3 se ilustran la vista superior y frontal de los reactores UASB, donde se indica la ubicación de sedimentadores y paredes.

También en esta Tabla 2, se indican los ensayos y las normas que los sustentan y que se seleccionaron para el estudio como resultado de una intensa actividad de revisión de la bibliografía disponible.

La identificación de los ensayos necesarios en el propio sitio de proceso dio vía al establecimiento de pruebas de laboratorio para determinar parámetros que permitieran luego hacer los

cálculos de estado de la instalación y vida residual de la misma. Estos ensayos de laboratorio se especifican en la Tabla 3.

TABLA 2. Selección de técnicas de análisis y zonas de ensayo in situ

ZONAS DE MUESTREO	ANÁLISIS QUÍMICO	NORMAS	SITIOS DE MUESTREO
Sedimentadores	Carbonatación	UNE 112-011-94	Sedimentador 1,9,18 UASB 1 y 3
	Concentración de Cl^-	ASTM C-1152	
	Concentración de $SO_4^{=}$	ASTM D-516	
Interior del reactor	Carbonatación	UNE 112-011-94	Cara norte, sur, oriente, occidente UASB 1 y 3
	Concentración de Cl^-	ASTM C-1152	
	Concentración de $SO_4^{=}$	ASTM D-516	
Superficie exterior del reactor	Medición de potenciales de corrosión	ASTM C-876	Lugares en los que se encontró descubierta la armadura del hormigón.

* En cada sitio se tomaron 3 puntos de muestreo

TABLA 3. Determinación de ensayos de laboratorio

ENSAYO	ESPECIFICACIONES	DURACIÓN
Difusividad ^a (en morteros con cemento tipo V) ASTM C-1202. Standard Test Method for electrical indication of Concrete's Ability to resist Chloride penetration	Ion Cl^- , electrodos de acero inoxidable Con aplicación de voltaje (12V)	72 horas
	Ion $SO_4^{=}$, electrodos de acero inoxidable Con aplicación de voltaje (12V)	72 horas
	Ion Cl^- , electrodos de grafito. Con aplicación de voltaje (12V)	72 horas
	Ion $SO_4^{=}$, electrodos de grafito. Con aplicación de voltaje (12V)	72 horas
	Iones Cl^- y $SO_4^{=}$ electrodos de acero inoxidable. Con aplicación de voltaje (12V)	72 horas
Celdas de Inyección ^b (en varillas de acero para refuerzo de concreto, tipo A-37 y PDR-60)	Se realizó con mezcla de iones Cl^- y $SO_4^{=}$ en solución simulada de concreto. Con incrementos de concentración cada 3 días.	30 días

^aEl objetivo de este ensayo es evaluar la permeabilidad del concreto a los iones cloruros y sulfatos en el concreto en estructuras susceptibles en su ambiente de servicio a la corrosión del refuerzo, con el fin de conocer la velocidad de difusión de los iones a través del hormigón.

^bEste ensayo proporciona datos sobre las concentraciones de iones cloruro y sulfato a los cuales se inicia la corrosión en el acero del refuerzo y permite determinar la velocidad a la cual la armadura pierde sección, por corrosión de la misma.

* Para el ion sulfato se desarrolló un procedimiento basado en la norma ASTM C-1202.

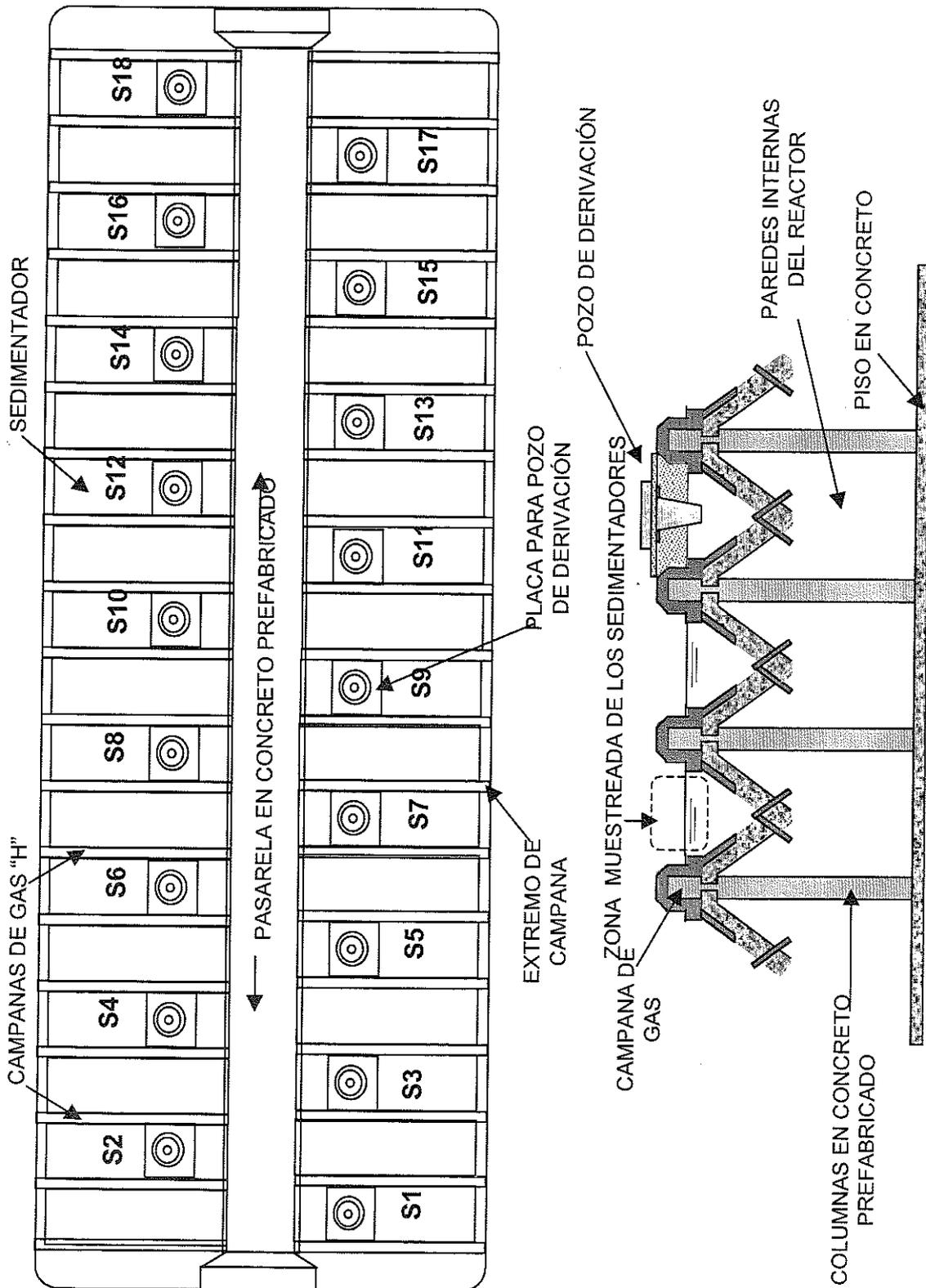


FIGURA 3. Vista superior y frontal de los reactores UASB.

• Descripción de los ensayos de laboratorio

Celda de difusión

Se construyeron celdas cúbicas en acrílico de 110mm de lado, con una pared central de espesor 10mm, provista de una abertura circular de 78mm de diámetro, quedando la celda dividida en dos compartimientos, cada uno fue ocupado con un volumen aproximado de 270cm³ de disoluciones, en un lado sólo solución de Ca(OH)₂ y en el otro solución de Ca(OH)₂ con NaCl (3%), Na₂SO₄ (3%) y una tercera corrida con NaCl (3%) y Na₂SO₄ (3%)¹.

Se utilizaron electrodos de acero inoxidable y de grafito, como se indicó en la tabla 3, y se aplicó una diferencia de potencial de 12V durante un periodo de 72h. Al mismo tiempo se tomó una parte alícuota (10ml) del lado de la celda con concentración de sales para análisis del contenido de los aniones difundidos (mínimo 5 muestras por día) y simultáneamente se anotaron las lecturas de corriente cada 15 minutos. A lo largo del ensayo la temperatura del sistema fue constante 24-25°C.

Celda de inyección

La celda de inyección fue un cubo en acrílico de 150mm de lado, con tapa del mismo material, la cual lleva 4 perforaciones simétricas en los lugares en los cuales se sujetaron las varillas y una perforación central para insertar el luggin con su electrodo de referencia (calomel).

En la celda de inyección se colocaron las barras de acero indicadas en la Tabla 3 en solución simulada de concreto (Ca(OH)₂ saturada), su uso obedece a que los cristales de Ca(OH)₂ pueden ocupar del 20% a 25% del volumen de la pasta del cemento, la solución saturada se preparó en relación 1,85g Ca(OH)₂ /L agua destilada.

Las varillas se sumergieron en la solución simulada de concreto, 24 horas después se midió su E_{corr} y se realizó una prueba de resistencia a la polarización, luego de esto se aplicaron incrementos de NaCl y Na₂SO₄ (3000 ppm) cada 3 días y se efectuó la medición de su E_{corr} y su R_p antes y después de cada adición. Este proceso se desarrolló durante 30 días, alcanzando una concentración máxima de 21000 ppm de iones cloruro y sulfato.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

• Identificación general de los principales problemas de corrosión en la P.T.A.R de Río Frio

Se examinaron los equipos de proceso de la P.T.A.R y se identificaron problemas en los sistemas de filtración, en los reactores UASB y en los postes metálicos dispersos en el área de la Planta.

1. Cribado: El sistema de rejillas de acero al carbono que existió durante 1991-1998 presentó problemas de corrosión que hicieron necesario su reemplazo por un nuevo sistema fabricado en acero inoxidable el cual actualmente está presentando inicios de corrosión en la carcasa del motor.
2. Desarenador: Es en concreto y no presenta problemas visibles de corrosión.
3. Reactores UASB: En la parte visible de los reactores se aprecia un deterioro significativo en la interfase líquido-gas de los sedimentadores. En algunos lugares de la parte exterior de las campanas de gas se encuentran al descubierto porciones de varilla. Las cubiertas de los sedimentadores están destruidas por la corrosión.
4. Lagunas Facultativas: Como están construidas en terreno natural, no presenta problemas de deterioro aparentemente.
5. Quemadores: Existen 3 quemadores de gas de los digestores de acero al carbono, los cuales presentan corrosión a lo largo de su estructura, especialmente en los últimos 2 metros.
6. Otros: Los postes metálicos que se encuentran dispersos en el área de la PTAR presentan corrosión en las zonas en que han perdido la pintura protectora.

• Resultados en pruebas in situ

Se realizó un análisis de varianza⁷ sobre las mediciones de carbonatación, concentración de Cl^- y SO_4^{2-} , realizadas en los sedimentadores y en las paredes a diferentes profundidades. Por medio del nivel de significancia se concluyó que se podían promediar estos parámetros en las paredes internas de los reactores, pero en el caso de los sedimentadores estos tenían valores diferentes en la zona expuesta a la atmósfera, en la zona expuesta al líquido y en la zona expuesta a la interfase liq-gas.

Los resultados de las pruebas de carbonatación, cloruros y sulfatos que se realizaron en los

sedimentadores y paredes internas de los reactores, indicados en la tabla 2 se presentan en las tablas 4, 5 y 6 respectivamente.

Los resultados de las pruebas de carbonatación en las paredes internas no se presentan, debido a que los valores medidos no representan un riesgo en esas zonas. Los sedimentadores se dividieron en 3 zonas de muestreo: zona expuesta a la fase gaseosa, zona expuesta a la interfase líquido-gas y zona expuesta a la fase líquida. En cada una de estas zonas se realizaron los análisis ya mencionados.

TABLA 4. Resultado final de la prueba de carbonatación en los sedimentadores de los reactores UASB

	Zona	Profundidad Promedio de Carbonatación (mm)	Tiempo Promedio para que la carbonatación alcance la armadura (años)*
REACTOR UASB 1	Fase gaseosa	8,7	83
	Interfase líquido-gas	19,58	16
	Fase líquida	6,15	167
REACTOR UASB 3	Fase gaseosa	6,12	96
	Interfase líquido -gas	16,55	13
	Fase líquida	4,57	172

*El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación 1.

TABLA 5. Resultados de la prueba de cloruros en los reactores UASB

	Zona	Profundidad de Penetración (mm)	Tiempo necesario para que los iones Cl^- alcancen la armadura (años)*
REACTOR UASB 1	Fase gaseosa de Sedimentadores	24,56	10
	Interfase de Sedimentadores	41,82	4
	Fase líquida de Sedimentadores	19,74	16
	Paredes $h_{\text{PROM}} = 1,46$ m	27,01	24
REACTOR UASB 3	Fase gaseosa de Sedimentadores	18,5	11
	Interfase de Sedimentadores	29,47	4
	Fase líquida de Sedimentadores	14	18
	Paredes $h_{\text{PROM}} = 1,50$ m	24,61	17

* El cálculo se realizó según la ecuación 2.

TABLA 6. Resultado final de la prueba de sulfatos en los reactores UASB

	Zona	Profundidad promedio de Penetración (mm)
REACTOR UASB 1	Fase gaseosa de sedimentadores	26,38
	Interfase líquido – gas de sedimentadores	37,27
	Fase líquida de sedimentadores	19,14
	Paredes $h_{PROM} = 1,46$ m	57,74
REACTOR UASB 3	Fase gaseosa de sedimentadores	32,37
	Interfase líquido – gas de sedimentadores	39,59
	Fase líquida de sedimentadores	18,79
	Paredes $h_{PROM} = 1,50$ m	41,72

• **Resultados en pruebas realizadas en el laboratorio**

Pruebas de difusividad

Con los datos medidos de corriente y concentraciones de los iones se hicieron las curvas de corriente vs. tiempo y concentración vs. tiempo para cada ensayo. De las curvas i vs. tiempo, ver figuras 4 y 5, se calculó el área bajo la curva y el valor obtenido corresponde a la carga total pasada (Q) durante la prueba, la cual es un parámetro que indica el grado de penetrabilidad del ion cloruro en los morteros cementicios¹.

De las curvas Concentración vs. Tiempo se obtuvo la pendiente de cada una (ppm/h), que permite calcular el coeficiente de difusividad en cada caso mediante la siguiente expresión, que proviene de la ecuación de Nernst – Planck la cual combina los conceptos de difusión y conducción:

$$D = \frac{JRTL}{zF\Delta EC} \quad (5)$$

Donde:

- D: Coeficiente de difusión (m^2/s)
- J: Flujo iónico ($mol/m^2.s$)
- R: Constante de los gases ($J/mol.K$)
- T: Temperatura (K)
- L: Espesor de la muestra (m)
- z: Valencia del ion (eq/mol)
- F: Constante de Faraday (C/eq)
- ΔE : Diferencia de potencial aplicado (V)
- C: Concentración iónica (mol/m^3)

En la Tabla 7 se presenta una comparación entre los coeficientes de difusión calculados a partir de las pruebas de laboratorio y de las pruebas in situ.

TABLA 7. Comparación de los coeficientes de difusión medidos in situ y obtenidos experimentalmente

		D (m^2/s) IN SITU	D (m^2/s) EXPERIMENTAL
Ion Cl^-	Reactor 1	4,2829 E - 12	4,2952 E -11
	Reactor 3	3,6711 E - 11	
Ion $SO_4^{=}$	Reactor 1	7,1509 E -13	1,9385 E -13
	Reactor 3	5,7832 E - 12	

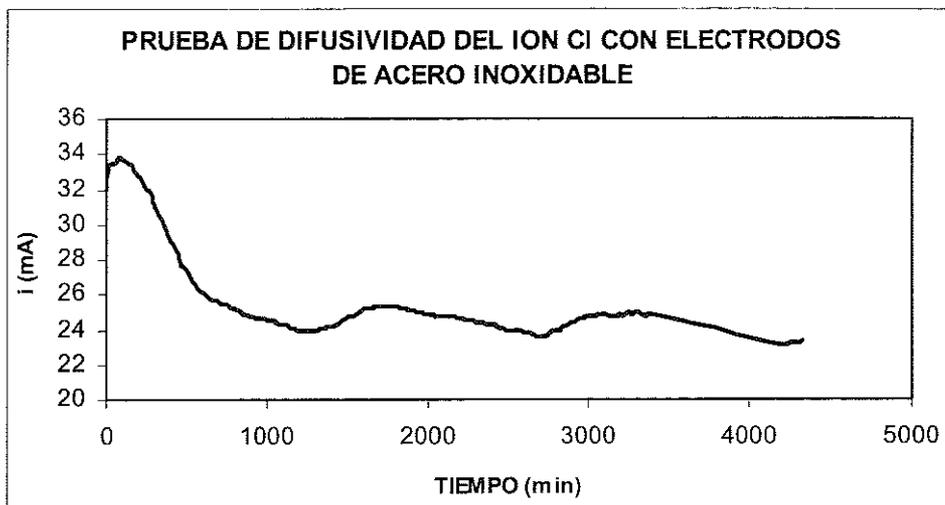


FIGURA 4. Curva de corriente vs. tiempo del ion Cl^- con electrodos de acero inoxidable.

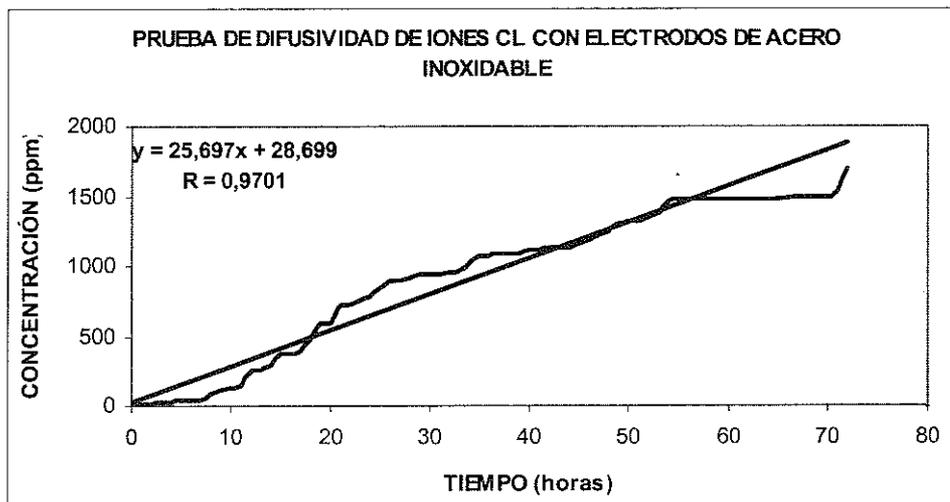


FIGURA 5. Curva de concentración vs. tiempo del ion Cl^- con electrodos de acero inoxidable

Celdas de inyección para las varillas tipo PDR-60 y A-37

A partir de las pruebas de las celdas de inyección se midieron los potenciales y velocidades de corrosión mediante curvas de Resistencia a la Polarización (R_p) y Taffel², a diferentes concentraciones de iones Cl^- (NaCl) y SO_4^{2-} (Na_2SO_4), en solución simulada de concreto

($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Estas medidas se realizaron en un Potenciostato/Galvanostato, cada vez que se hacían los incrementos de concentración.

Se utilizaron como electrodos de trabajo y auxiliares, material obtenido de las varillas tipo PDR-60 y A-37; el electrodo de referencia fue de calomel saturado.

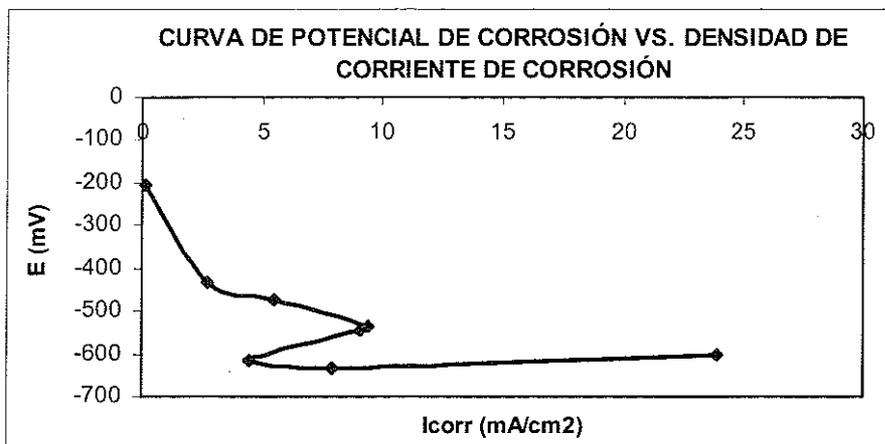


FIGURA 6. Potencial de corrosión vs. Densidad de corriente de corrosión. Varillas tipo PDR-60

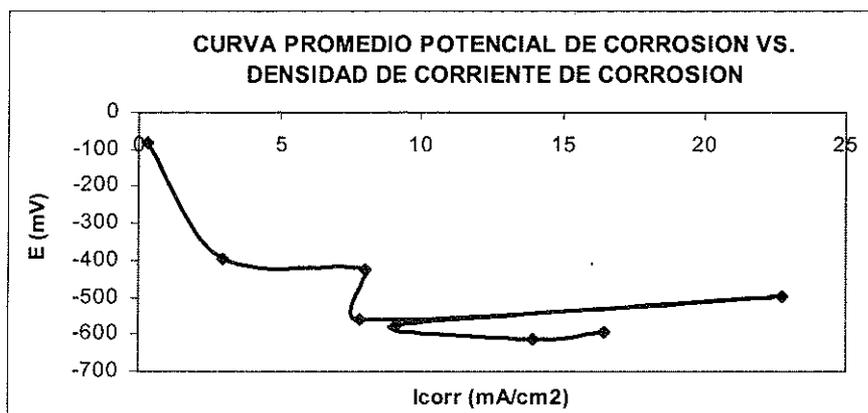


FIGURA 7. Potencial de corrosión vs. Densidad de corriente de corrosión. Varillas tipo A-37

CONCLUSIONES

El diagnóstico resultante de las pruebas de carbonatación indica que su grado de penetración no representa un peligro significativo en el tiempo de servicio de la estructura, excepto en la interfase líquido – gas de los sedimentadores en los que alrededor de 10 años llegará a la armadura.

El análisis de penetración de iones cloruros en las paredes internas de los reactores estima que alrededor de 20 años éstos alcanzarán la armadura, mientras que en la zona de la interfase líquido-gas de los sedimentadores tan sólo tardará 4 años. Según la Norma EH – 91 de España el valor crítico de cloruros en hormigones reforzados debe ser $\leq 0.40\%$ en base al contenido de cemento, y este valor sólo es superado en la interfase líquido - gas de los sedimentadores del Reactor UASB 1.

El ion sulfato presenta concentraciones en la superficie del hormigón alrededor de $0.4 - 0.7\%$ y en la interfase líquido – gas de los sedimentadores de $0.8 - 1.5\%$ en base al contenido de cemento. Estos valores son muy altos, debido a que la formación de cristales aciculares, prácticamente reconocibles, empieza a tener lugar en concentraciones de 254 ppm y se forma gran cantidad de sulfoaluminato cálcico a concentraciones mayores a 1000 ppm. Estos compuestos formados aumentan el volumen al cristalizar, conduciendo al desmoronamiento del hormigón por la fuerte expansión desarrollada.

A pesar de que el interior del reactor UASB 3 está totalmente recubierto con resina epóxica, esto no asegura una mayor protección a los iones agresivos, ya que éstos han penetrado a una mayor profundidad que en el reactor

UASB 1, lo que puede deberse a mala calidad de los materiales y técnicas de construcción en este reactor.

Las medidas del coeficiente de difusividad realizadas a testigos de los reactores UASB 1 y 3 fueron mayores alrededor de un orden de magnitud para el reactor 3, lo cual puede ser causado por lo planteado en el párrafo anterior, ó porque el coeficiente de difusión disminuya con el tiempo debido a la saturación de iones dentro de la pasta de cemento.

En las pruebas de resistencia a la polarización efectuadas en las celdas de inyección se evidenció que las varillas lisas Tipo A-37 y las varillas gruesas Tipo PDR - 60 presentaron velocidades de corrosión medianamente altas que oscilaron entre 2 - 11 mpy a concentraciones entre 3000 - 12000 ppm, a concentraciones mayores se presentó un proceso de pasivación en ambas conllevando unas velocidades de corrosión despreciables.

ABSTRACT

Corrosion problems presented in Rio Frio Wastewater Treatment Plant (PTAR), which belong to the Regional Autonomous Corporation, and is in charge of treatment of the wastewater of Bucaramanga's south zone, were analyzed in this study.

A preliminary inspection was carried out to the PTAR, for determining test zones and the advance of corrosion in the structure of UASB reactors. Carbonatation, chlorides concentration and sulphate tests were determined in two of three UASB reactors existing in the plant, inside and in the top corresponding to settlers zone. The time in that the carbonatation and choride ions will reach the reactors reinforcement, was predicted and from the profile of chlorides concentration measured in every sample the diffusion coefficients of chloride and sulphate ions in the structure were calculated.

Diffusion tests and injection cells were carried out; in the laboratory; cement mortar type V was used in the former and simulated solutions of concrete with Cl^- and SO_4^{2-} ions. In the injection cells was used steel rod type A-37 and PDR-60 and Polarization Resistance (Rp) curves were carried out daily.

BIBLIOGRAFIA

1. R. M. Gutiérrez, C. Gutiérrez, Ensayo modificado de permeación a cloruros en materiales cementicios. 2^{do} NACE Latin American Region Corrosion Congress.; 12 p, 1996.
2. D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion.; 435 p, New Jersey, 1996.
3. C. J. Kitowski, H. G. Wheat, Effect of chlorides on reinforcing steel exposed to simulated concrete solutions, Corrosion, 53 (3): 216-226, 1997.
4. G. Lettinga, L. W. Hulshoff, Anaerobic Reactor Technology, Agricultural University of Wageningen.; 220 p, Holanda, 1991.
5. G. Maskew, J. C. Geyer, Ingeniería Sanitaria y de Aguas residuales.; 380 p, México, 1980.
6. Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales, Vol. 1: 486 p, Vol. 2: 512 p, 1995.
7. D. C. Montgomery, G. Ranger, Probabilidad y Estadística Aplicadas a la ingeniería.; 504 p, 1996.
8. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.; 208 p, Río de Janeiro, 1997.
9. F. J. Quintero, Corrosión del Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto. Instituto Colombiano del Petróleo, División de Tecnologías Complementarias.; 115 p, Bucaramanga, 1997.
10. L. Wildschut, Diseño de Reactores UASB para Aguas Residuales Domésticas. Escuela Holandesa de Ingenieros y Arquitectos de Haskoning.; 234 p, Holanda, 1989.